POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento B.E.S.T.
"Building Environment Science & Technology"

Dottorato di Ricerca in "Sistemi e Processi Edilizi"
– XVII ciclo (2002/2005) –

Tesi di Dottorato:

"Proposizione di percorsi metodologici innovativi applicabili alla valutazione della durabilità di elementi tecnici edilizi e degli elementi funzionali costituenti"

Tutor: Prof. Pietro Natale MAGGI
Coordinatore del dottorato: Prof. Sergio CROCE

Dottorando: Ing. Paolo IACONO
Matricola: D01271

POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento B.E.S.T.
"Building Environment Science & Technology"

Dottorato di Ricerca in "Sistemi e Processi Edilizi"
– XVII ciclo (2002/2005) –

Tesi di Dottorato:

"Proposizione di percorsi metodologici innovativi applicabili alla valutazione della durabilità di elementi tecnici edilizi e degli elementi funzionali costituenti"

Ai miei genitori,
per i quali farei qualsiasi cosa pur di saperli orgogliosi di me

e

A Pietro Natale MAGGI,
straordinario nella sua capacità di annullare l'infinito divario
che c'è tra chi sa e chi cerca di sapere

INDICE

Prefazione – Struttura e scopo della tesi **1**

1ª PARTE
– Inquadramento generale del problema durabilistico –

Cap. 1 – Introduzione – Perché parlare di durabilità? **3**
1.1 La qualità come ottimizzazione del rapporto costi – benefici 3
1.2 Il concetto di "costo globale" 3
1.3 Il problema dei costi di gestione e del risparmio energetico 5
1.4 Il problema dei costi di manutenzione 7

Cap. 2 – I parametri di valutazione della durabilità **11**
2.1 Durata 12
2.2 Affidabilità 14
2.3 Tasso di guasto 15

Cap. 3 – Il quadro normativo internazionale **17**
3.1 L'attività internazionale, dalla Direttiva 89/106/EEC allo standard ISO 15686 17
3.2 Il contributo italiano in ambito UNI 33

Cap. 4 – La durabilità e l'esigenza di un approccio integrato **34**
4.1 Metodologia per la valutazione di vita utile in condizioni di riferimento – RSL 34
4.2 Metodologia per la valutazione di vita utile in condizioni di progetto – ESL 42
4.3 L'affidabilità: un'illustre sconosciuta 43
4.4 Un metodo per la valutazione della propensione all'affidabilità 45

Cap. 5 – Il dibattito internazionale e l'apertura verso nuovi metodi **55**
5.1 Metodi probabilistici 57
5.2 Metodi ingegneristici 59

Cap. 6 – Progettazione e programmazione della manutenzione **62**
6.1 Degrado, obsolescenza e patologia 63
6.2 I parametri di valutazione della manutenibilità 65
6.3 Progettare la manutenzione 67
6.4 Programmare la manutenzione 69

2ª PARTE
– Contributi all'attività di ricerca in ambito ISO –

Cap. 7 – L'attività sperimentale per la determinazione della RSL **75**
7.1 Da dove è nata la necessità di avviare il programma sperimentale 75
7.2 Struttura del programma sperimentale 75
7.3 L'attività di laboratorio 76

7.4 I contributi forniti dall'esposizione in esterno 77
7.5 Incremento di massa 79
7.6 Fotografie superficiali 80
7.7 Re-scaling 85
7.8 Valutazione della vita utile 86
7.9 Conclusioni 88
7.10 Sviluppi futuri della ricerca 89

Cap. 8 – Evoluzione del Metodo Fattoriale 91
8.1 L'esigenza di un Metodo Fattoriale più oggettivo 91
8.2 Strumenti e linee guida per la valutazione del fattore A 92
8.3 Caso di studio 101
8.4 Sviluppi futuri della ricerca 113

3ª PARTE
– Proposizione di ulteriori percorsi metodologici –

Cap. 9 – La stima della propensione alla durabilità: un'integrazione metodologica 116
9.1 Performance Limits Method (PLM) 116
9.2 Modelli di calcolo adottati 118
9.3 I limiti del PLM 121
9.4 Come sfruttare il PLM – Esemplificazione di un caso di studio 122
9.5 Il primo indicatore di propensione alla durata 123
9.6 Il secondo indicatore di propensione alla durata 134
9.7 La stima della propensione all'affidabilità 139
9.8 Caso di studio – Sintesi dei risultati ottenuti 146
9.9 Complementarietà ed interrelazioni tra i due metodi 148
9.10 Limiti e campi di applicazione 151
9.11 Sviluppi futuri della ricerca 154

Cap. 10 –Il contributo del CSTB: FMEA e FMECA 155
10.1 Analisi strutturale 156
10.2 Analisi funzionale 162
10.3 Analisi processuale 164
10.4 Analisi qualitativa (FMEA) 166
10.5 FMECA e la valutazione della gravità degli scenari 169
10.6 IG_1 – Il primo indice di gravità (o indice funzionale) 170
10.7 IG_2 – Il secondo indice di gravità (o indice manutentivo) 180
10.8 Sviluppi futuri della ricerca 183

Conclusioni generali 186

Riferimenti bibliografici 188

Riferimenti normativi 194

Prefazione – Struttura e scopo della tesi

Il presente lavoro è stato pensato in tre parti, nell'intento di accompagnare il lettore in modo graduale e razionale nella disamina di un aspetto edilizio tanto vasto quanto intrigante.

Scopo della **parte 1** del volume (che raccoglie i primi sei capitoli) è quello di fornire un inquadramento generale delle problematiche legate all'aspetto durabilistico, nella speranza di rendere manifesta l'importanza della "durabilità", non tanto come fenomeno a se stante, quanto all'interno di un discorso più complesso ed articolato che muove da concetti fondamentali quali l'ottimizzazione dei costi e il risparmio energetico per culminare, a valle, con indicazioni preziose nella fase di programmazione gestionale dell'opera. E', infatti, preoccupazione di chi scrive fornire tutti quegli elementi che, solo se pienamente recepiti, svilupperanno una sensibilità tale da non far trascurare un problema ancora poco affrontato nella realtà quotidiana.

Le parti 2 e 3 mirano a mettere in luce i contributi del candidato in riferimento all'attività di ricerca svolta in questi ultimi anni all'interno del DBCG (Durability of Building Components Group) nel campo della valutazione della durabilità dei componenti edilizi. Si è ritenuto tuttavia conveniente (dal punto di vista della miglior efficacia espositiva) separare le attività di ricerca secondo quanto segue:

- I contenuti relativi alla **parte 2** si integrano fortemente con le indicazioni emanate in ambito normativo e sperimentale rispettivamente dai gruppi di lavoro ISO TC59 / SC14 "Design Life" e CIB W080 / RILEM TC 175 "Service Life Methodologies". In particolare, quanto esposto nel capitolo 7 ripropone molto da vicino la metodologia di predizione di vita utile di componenti edilizi illustrata nello standard internazionale ISO 15686, applicata nella fattispecie ad elementi tecnici appartenenti alla classe delle pareti perimetrali verticali non portanti. Il capitolo 8 invece, mette in luce contributi legati all'utilizzo del Metodo Fattoriale che consentirà il passaggio dalla "Reference Service Life" restituita dal programma sperimentale alla "Estimated Service Life" dei componenti indagati ed operanti in ben precise condizioni d'uso e di sollecitazione;

- I contenuti relativi alla **parte 3** rappresentano invece contributi sviluppati più a livello "locale" (in ambito dipartimentale), ma che attraverso l'attività e l'impegno dell'intero DBCG potranno essere auspicabilmente recepiti in prima istanza a livello nazionale e, in futuro, addirittura in contesti più rilevanti. In questo senso i capitoli 9 e 10 rappresentano la proposta di ulteriori percorsi metodologici che per svilupparsi pienamente faranno propri anche i contributi di un centro di ricerca di spessore internazionale come il CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Strumenti previsionali alternativi al Metodo Fattoriale verranno utilizzati per trarre indicazioni sulla vita utile di oggetti edilizi in termini di "propensione alla durabilità", mentre lo studio dei modi di guasto e delle loro criticità consentirà di trarre importanti informazioni di ausilio al progettista nello sviluppo di corrette strategie manutentive, gettando le basi per un'adeguata programmazione della manutenzione.

1ª PARTE

Inquadramento generale del problema durabilistico

Cap. 1 – Introduzione – Perché parlare di durabilità?

L'importanza di una tematica come quella della durabilità, e quindi delle problematiche ad essa connesse, può essere meglio compresa attraverso alcune semplici considerazioni che troppo spesso, ancora oggi, vengono disconosciute o (peggio ancora) scientemente trascurate.
La prima riflessione da cui può essere opportuno partire è relativa al concetto di qualità, quanto mai imperante al giorno d'oggi, ma che rischia di stravolgere, fagocitandole, le caratteristiche più "veraci" dell'**ingegneria**, intesa come "**studio e realizzazione delle tecniche** con cui si applicano le enunciazioni teoriche e le norme di funzionamento di una disciplina, scienza o fenomeno sociale **allo scopo di evitarne uno sviluppo casuale e frammentario**"[1].
Non ha senso difatti parlare di qualità senza prima chiarire un punto fondamentale, ovvero che la "Qualità" non esiste. O meglio, non esiste la qualità *tout court*, intesa come qualità totale di un bene edilizio[2].

1.1 La qualità come ottimizzazione del rapporto costi – benefici

In sintesi è bene dunque evidenziare come la qualità non sia un valore assoluto, ma che al contrario dev'essere di volta in volta ben ponderato. Nel campo edilizio, in particolare, la qualità andrà sempre commisurata alla destinazione d'uso, alla contestualizzazione dell'opera, al budget a disposizione del committente e così via. E' del resto intuitivo per chiunque che, ad esempio, la progettazione di uno stand fieristico rispetto a quella di un edificio residenziale non potrà prescindere dal carattere temporaneo del primo intervento, che proprio per questo dovrà confrontarsi con esigenze prestazionali ben diverse dal punto di vista del comfort termoigrometrico, acustico, meccanico, ecc…
Appare altrettanto intuitivo come la qualità di un intervento edilizio, anche a parità di destinazione d'uso, possa essere intesa diversamente a seconda che la stessa opera (si pensi pure ad un ospedale) venga realizzata grazie ai finanziamenti di una grande capitale europea o di un piccolo comune di provincia.
Da queste prime riflessioni appare chiaro dunque come il buon progettista non debba perseguire un concetto di qualità atta a fornire la massima risposta prestazionale; buon progettista sarà colui che riuscirà a fondere intimamente considerazioni di tipo economico e prestazionale e ad armonizzare sapientemente tali parametri in modo da ottenere di volta in volta, per quel determinato tipo d'intervento ed in quella determinata realtà geografica, la soluzione economicamente più vantaggiosa.
L'ottimizzazione del rapporto costi-benefici sarà dunque per noi la cartina al tornasole, lo strumento più opportuno per leggere la qualità di un'opera edilizia.

1.2 Il concetto di "costo globale"

Chiarito questo primo punto, si tratta ora di indagare meglio su cosa si intenda per "costo" di un immobile.
Pratica consolidata, purtroppo ancora oggi, consiste nel fermare l'analisi e la pianificazione dei costi alla fase conclusiva delle opere di edificazione.

[1] Da "Il nuovo Zingarelli – Vocabolario della lingua italiana", Nicola Zingarelli, Zanichelli editore.
[2] Per quanto tali considerazioni possano essere generalizzate anche ad altri beni.

Nei casi più evoluti o più complessi, questa valutazione si estende, in termini spesso vaghi e parziali, ai costi di esercizio (o di funzionamento), quando oramai già da tempo il quadro legislativo (soprattutto nelle sue implicazioni relative alla progettazione ed esecuzione di opere pubbliche) ha introdotto il cosiddetto "costo del ciclo di vita" o "costo globale" come "l'insieme dei costi generati durante il ciclo di vita dell'entità"[3].
Col termine "costo globale" dunque vengono messe in evidenza tutte quelle componenti di costo relative all'opera stessa, a partire dalla fase di pianificazione dell'intervento fino alla fase di dismissione o recupero.
Generalmente si usa suddividere le componenti del costo globale in tre macrofamiglie [Molinari, 2002]:

- **Costi iniziali**, che comprendono tutti i costi necessari alla realizzazione dell'opera e che confluiscono nell'immobile realizzato. Essi sono articolabili a loro volta in:
    - Costi di studio;
    - Costi di progettazione;
    - Costi di costruzione.
- **Costi di gestione**, che comprendono tutti i costi necessari a garantire e supportare il funzionamento dell'immobile rispetto al compito ad esso assegnato per il suo intero ciclo di vita. Comprendono:
    - Costi di esercizio (o di funzionamento);
    - Costi di manutenzione.
- **Costi finali**, che comprendono tutti i costi che possono insorgere al termine della vita economica utile dell'edificio in relazione alle possibili strategie immobiliari che si intendono perseguire. Tra questi ultimi troviamo:
    - Costi di ristrutturazione globale o recupero;
    - Costi di dismissione (smontaggio e/o demolizione);
    - Costi di vendita.

Il quadro complessivo dei costi individuati che, nel loro insieme vanno a costituire il "costo globale", può essere rappresentato in un grafico che ne restituisca in forma orientativa e schematica i reciproci pesi e la loro distribuzione nel tempo (**fig. 1.1**).

[3] UNI EN 13306:2003 *Manutenzione – Terminologia*

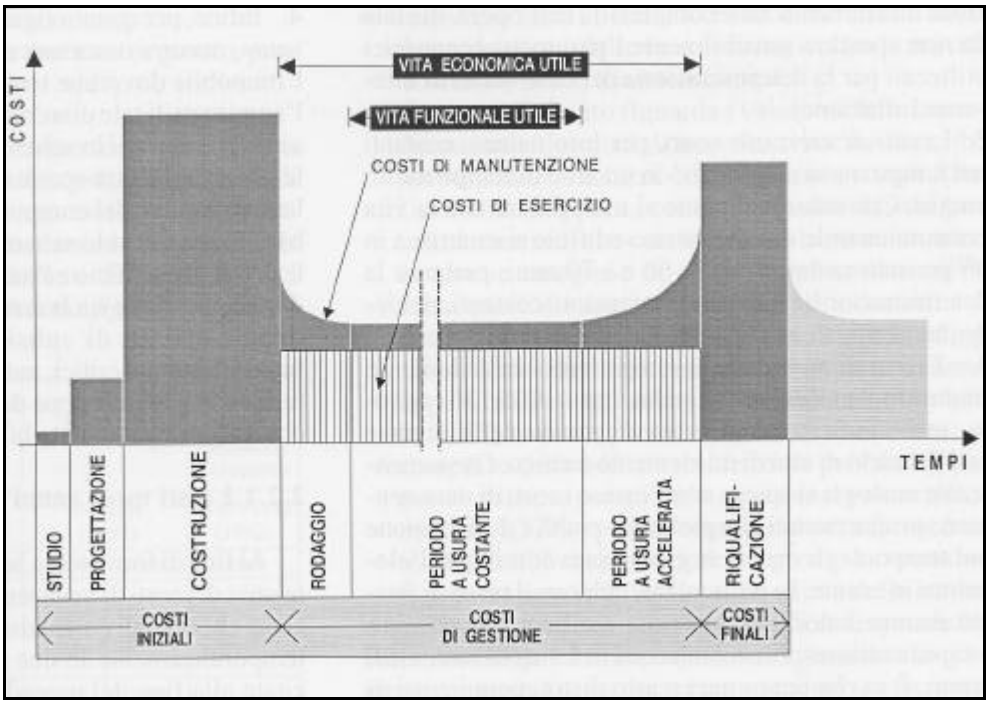

Fig. 1.1 – Componenti del "costo globale" e loro distribuzione nel ciclo di vita di un edificio

Purtroppo, questa inerzia a recepire le volontà del legislatore è amplificata dalla prassi dei soggetti attivi nel settore delle costruzioni, che non manifestano alcun interesse per la durata del ciclo di vita dell'immobile, né per i costi di gestione dello stesso. L'attenzione di tali figure è ancora troppo volta alla valutazione e al controllo dell'entità dei costi iniziali, rispetto ai massimi prezzi di vendita conseguibili sul mercato.
Sarebbe auspicabile tuttavia un cambiamento di prospettiva, soprattutto alla luce delle problematiche sempre più impellenti di natura sia economica che ambientale. Anche se con troppa fatica, si fa largo il principio della sostenibilità, secondo il quale lo sviluppo deve soddisfare i bisogni del presente senza compromettere le capacità delle generazioni future di soddisfare i propri.

1.3 Il problema dei costi di esercizio e del risparmio energetico

Tutto questo si traduce in un discorso che andrebbe recepito da più parti. Se è vero, infatti, che da un lato, per progettisti e costruttori, documenti come il fascicolo del fabbricato o il certificato energetico sono solo fantasmi di una normativa puntualmente disattesa, dall'altro lato l'utente finale al momento di acquistare un appartamento troppo spesso si cura solamente dei particolari più futili (come ad esempio le finiture) senza porsi il problema di quanto questo consumerà nell'arco dei successivi 50 anni.
Gioverebbe forse far notare, ai futuri acquirenti di un alloggio, che i costi di gestione in Costa Azzurra sono notevolmente inferiori a quelli di una stessa unità immobiliare acquistata in Liguria, a causa degli spessori degli isolanti fino a tre volte superiori.
I grafici che seguono (**figg. 1.2, 1.3 e 1.4**) sono tratti da uno studio condotto nel 2001 da EURIMA (EURopean Insulation Manufacturers Association) su diversi Paesi europei; si può notare come in Italia la soluzione delle problematiche relative a sostenibilità, conservazione delle risorse e contenimento delle emissioni di CO_2 sia ancora troppo lontana.

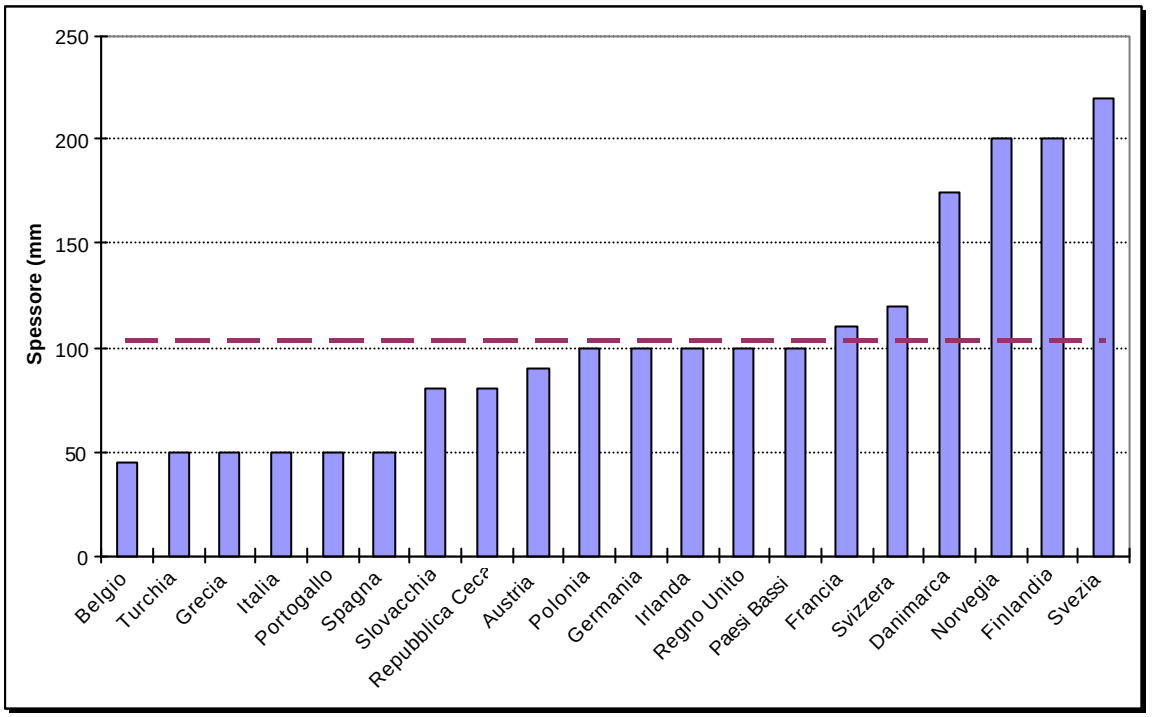

Fig. 1.2 – Spessore isolante delle pareti

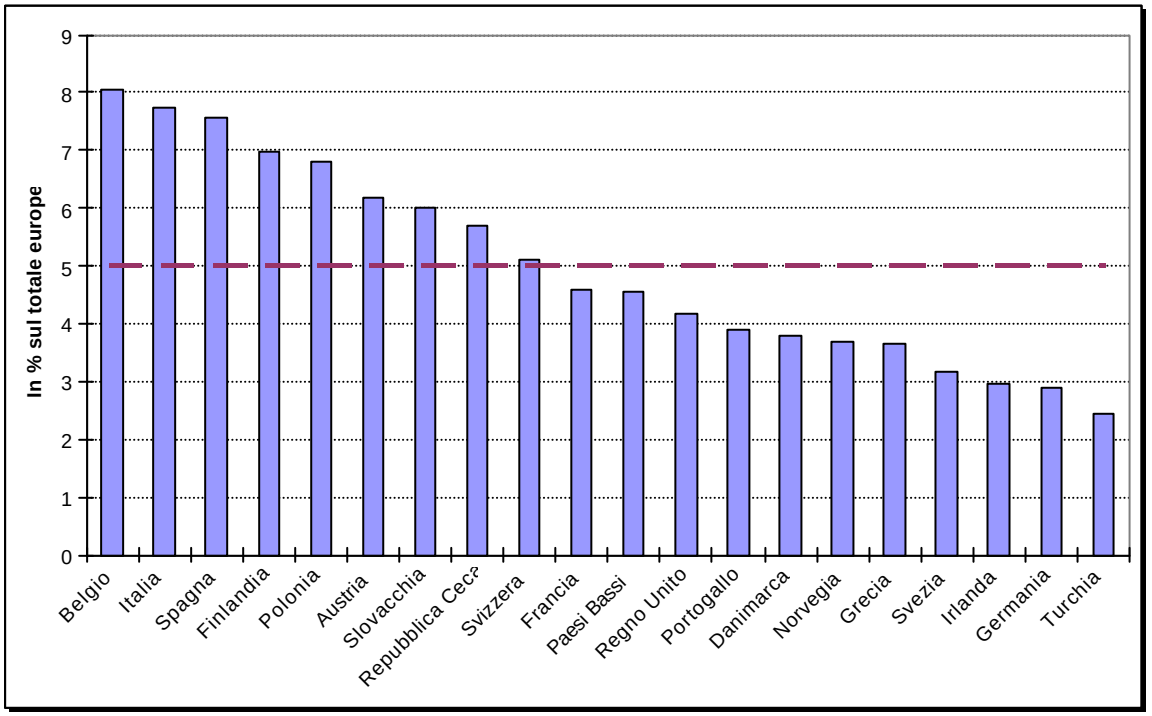

Fig. 1.3 – Perdita di energia totale imputabile alle case annualmente

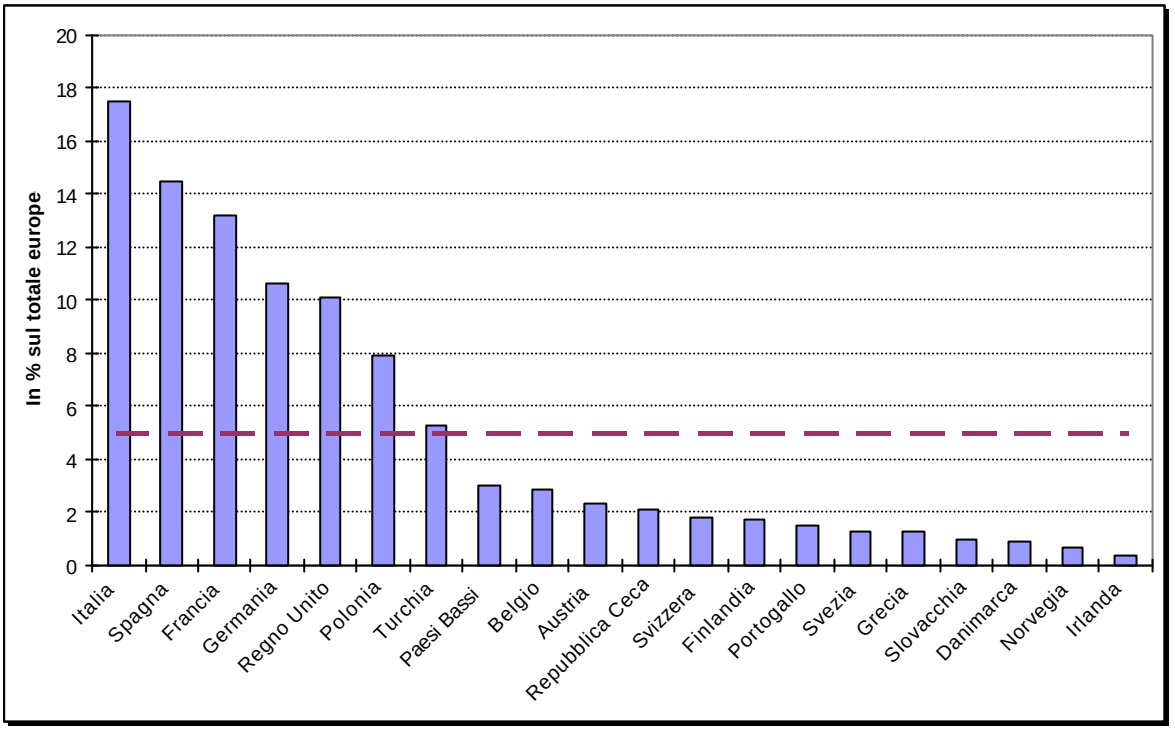

Fig. 1.4 – Emissioni di CO_2 totali imputabili alle case annualmente

1.4 Il problema dei costi di manutenzione

Una delle principali conseguenze dettate dalla necessità di adeguare gli edifici ai disposti legislativi in materia di contenimento dei consumi energetici introdotti nel nostro Paese a partire dagli anni '70 fu l'avvio di una consistente attività di manutenzione del patrimonio edilizio esistente.
La **figura 1.5** mostra l'entità odierna dei costi legati alla manutenzione, ed è tratta dal XII rapporto congiunturale CRESME[4] sul mercato delle costruzioni. I dati evidenziano come il recupero assorba più della metà delle spese della produzione nazionale (per l'esattezza il 56,5%) [Maranzana, 2005].

[4] CRESME – Centro Ricerche Economiche Sociali di Mercato per l'Edilizia e il territorio

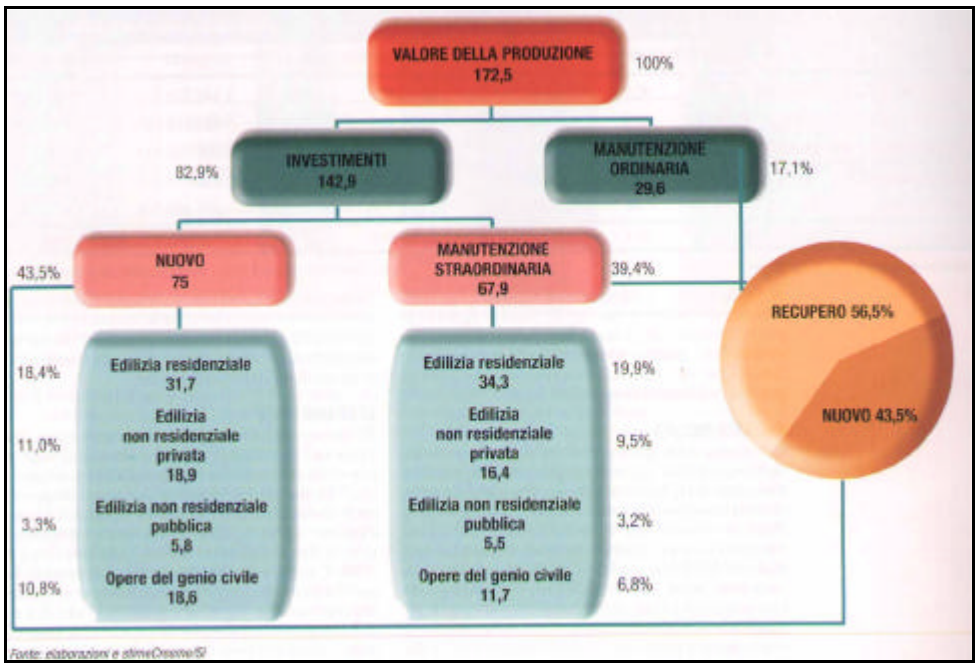

Fig. 1.5 – Il valore della produzione nazionale 2004 (valori in miliardi di euro)

Un'altra concausa dell'attività di riqualificazione e recupero del parco edilizio nazionale può essere individuata senz'altro in una caduta pressoché verticale della qualità degli edifici, fenomeno riconducibile principalmente ai seguenti motivi:

- Cattiva qualità dei materiali;
- Immissione sul mercato di prodotti nuovi e materiali poco noti;
- Assenza di manodopera specializzata in grado di gestire la crescente complessità tecnologica, sia in termini di comportamento nel tempo dei singoli prodotti, sia in termini di incompatibilità inerenti, meccaniche e chimico-fisiche tra differenti materiali accoppiati tra loro.

Tutto ciò si è tradotto, negli ultimi decenni, in un degradamento fisico, economico e prestazionale estremamente accelerato degli organismi edilizi, al punto da imporre interventi di riqualificazione globale già dopo venti o trent'anni dalla loro costruzione.
E' di Manfron [1995] uno studio del 1992 su un campione di edilizia residenziale pubblica di IACP[5] veneti, dal quale risulta come bastino 26 anni per raggiungere il "redoubling cost time", vale a dire il periodo di tempo alla fine del quale i costi di manutenzione sostenuti pareggiano il costo di costruzione. Questo dato è tanto più stupefacente se letto in parallelo con i risultati di un'indagine condotta sul comparto degli edifici pubblici da parte del Ministero delle Costruzioni giapponese, da cui risulta che il costo del ciclo di vita medio (circa 60 anni) di un edificio, ammonta a oltre sei volte il suo costo di costruzione, mentre i costi di manutenzione rappresentano quasi la metà del costo globale (**fig. 1.6**) [Ishizuka *et al.*, 1992].

[5] IACP – Istituto Autonomo per le Case Popolari

Fig. 1.6 – Confronto tra le componenti del ciclo di vita di un edificio

Letti con un taglio differente, i dati di Manfron e dei giapponesi ci rivelano come nell'arco di vita di un edificio, i costi di manutenzione possano arrivare a pesare fino a tre volte rispetto ai costi di costruzione.

Preso dunque atto della realtà legata al mondo della riqualificazione nel nostro Paese (ma non solo), appare evidente come la soluzione del problema dell'abbattimento dei costi (per poter perseguire quell'ottimizzazione del rapporto costi-benefici di cui poco sopra si è detto) debba passare soprattutto dalla componente manutentiva del costo globale.
Sempre il Molinari mostra come l'opportunità di abbattere i suddetti costi debba essere sfruttata fin dalle prime fasi del processo edilizio, quando ancora le decisioni da prendere, per quanto profonde e radicali, avranno comunque un'incidenza relativa sulle spese totali (**figura 1.7**).
Presupponendo, infatti, che il ciclo di vita di un sistema tecnico abbia inizio con la sua concezione progettuale, si sviluppi nella sua realizzazione e si prolunghi poi per la sua intera durata di vita, si può notare come la porzione più rilevante della previsione dei costi relativi al ciclo di vita abbia le sue radici nelle conseguenze di decisioni assunte nelle fasi di sviluppo del progetto, sia in quelle preliminari che in quelle di definizione tecnica.
Tali decisioni potranno dunque spaziare dall'impiego di differenti tecnologie all'adozione delle politiche di manutenzione da perseguire, dando vita di volta in volta a scenari più o meno vantaggiosi dal punto di vista economico-prestazionale.
Conscio di tutto ciò il legislatore, all'articolo 16 comma 5 della Legge Quadro in materia di Lavori Pubblici (L.109/94 e s.m.i.) prevedeva già dieci anni fa che, fin dalla fase di progettazione, venisse redatto il cosiddetto piano di manutenzione, inteso come una "*serie strutturata di impegni che comprendono le attività, le procedure, le risorse e il tempo necessario per eseguire la manutenzione*"[6].

[6] UNI EN 13306:2003 *Manutenzione – Terminologia*

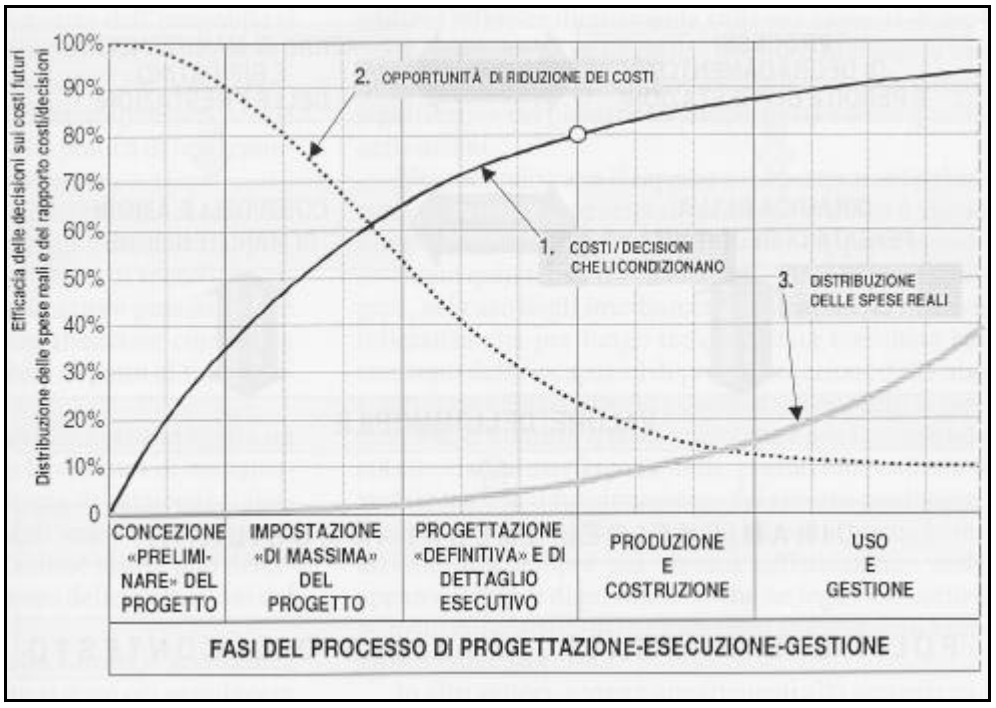

Fig. 1.7 – Il rapporto costi-decisioni nelle diverse fasi processuali

Ecco allora che appare finalmente evidente l'importanza della durabilità, quale "*capacità di un edificio o delle sue parti di fornire le funzioni richieste durante un determinato periodo di tempo, sotto l'influenza di agenti prevedibili*"[7].
Tutti i discorsi fatti fin qui, dalla necessità di ottimizzare i costi alla scelta delle differenti strategie manutentive, devono necessariamente passare da predizioni di vita utile di materiali e componenti edilizi, quali costituenti fondamentali dell'intero organismo edilizio.

Una delle grandi sfide dell'ingegnere edile odierno può dunque essere sintetizzata in una **maggiore capacità di previsione e di programmazione delle attività inerenti la manutenzione**, e l'unica possibilità che gli consentirà di superare tale prova è una **maggiore capacità di controllo dell'efficienza prestazionale degli elementi tecnici nel tempo.**

[7] ISO 15686-1:2000 *Building and constructed assets Service life planning: General principles*

Cap. 2 – I parametri di valutazione della durabilità

Abbiamo visto come non abbia senso, per un oggetto edilizio, parlare di una qualità assoluta, e come possano esistere tante differenti sfaccettature di un aspetto che in prima approssimazione sembrerebbe di facile interpretazione. Ma come può essere definita allora la **qualità edilizia**? Una delle definizioni più care a chi scrive è senz'altro quella di "misura del grado di **rispondenza delle prestazioni** dell'opera realizzata **ai requisiti** che ne hanno guidato la concezione, la progettazione, la produzione, la costruzione e la gestione" [Maggi, 1994a].
In questo senso esisteranno tanti volti della qualità quanti sono i diversi tipi di requisiti che dovranno essere garantiti per la sicurezza ed il benessere dell'utente finale.
In particolare, una componente della qualità (detta funzionale-spaziale) misurerà il grado di rispondenza ai requisiti di fruibilità dello spazio, un'altra componente (detta ambientale) misurerà il grado di rispondenza ai requisiti di benessere, e così via…
Più formalmente la qualità edilizia viene definita come l'"insieme delle proprietà e delle caratteristiche dell'organismo edilizio o delle sue parti che conferiscono ad essi la capacità di soddisfare, attraverso prestazioni, esigenze espresse o implicite"[8].
La qualità edilizia viene poi generalmente scomposta in:

- Qualità funzionale-spaziale;
- Qualità ambientale;
- Qualità tecnologica;
- Qualità tecnica.

Di questi aspetti, quello che ci interessa più da vicino è la qualità tecnologica, definita all'interno della stessa UNI 10838 come l'"insieme delle prestazioni tecnologiche dei sub-sistemi e degli elementi tecnici di un organismo edilizio".
La qualità tecnologica, a sua volta, risulta essere costituita da quattro componenti, le cui valutazioni devono presiedere alla progettazione tecnologica di un elemento tecnico per contribuire contestualmente ad ottimizzare le scelte di progetto di un intervento edilizio.
Questi aspetti sono:

- La **qualità tecnologica caratteristica (Q_c)**: attitudine del prodotto a fornire livelli di prestazione tecnologica prima della sua messa in opera (al tempo zero);
- La **qualità tecnologica utile (Q_u)**: attitudine del prodotto a mantenere nel tempo i livelli di prestazione tecnologica iniziali caratterizzanti la qualità tecnologica al tempo zero;
- La **qualità tecnologica manutentiva (Q_m)**: attitudine del prodotto a consentire livelli specifici di manutenzione;
- La **qualità tecnologica operativa (Q_o)**: attitudine del prodotto a consentire livelli specifici di economicità nella messa in opera.

[8] UNI 10838 *Edilizia – Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia*

In questa sede verranno approfondite tematiche relative alla qualità tecnologica utile, dal momento che ad essa è demandato il compito di valutare il grado di rispondenza ai requisiti di durabilità, connotanti il comportamento nel tempo dei componenti edilizi e, in generale, dell'intera opera. Per le forti ricadute che i risultati in questo campo potranno fornire al problema dell'ottimizzazione del costo globale, nel capitolo 6 verranno trattati necessariamente anche aspetti legati alla qualità tecnologica manutentiva, che per una corretta impostazione dal punto di vista progettuale richiede come dati di input proprio l'informazione restituita dalla progettazione tecnologico-funzionale.

Chiariti i motivi che ci hanno spinto ad affrontare la tematica della valutazione della durabilità di elementi tecnici e componenti edilizi e individuato l'ambito di appartenenza della durabilità all'interno del processo edilizio, è importante cercare di capire quali siano i principali protagonisti, le grandezze fondamentali su cui focalizzare la nostra attenzione.
I parametri utilizzati nella valutazione della durabilità sono i seguenti:

2.1 Durata

Il primo e più intuitivo parametro che governa il requisito di durabilità è la durata, intesa come periodo di tempo, dopo l'installazione, durante il quale l'edificio o le sue parti mantengono livelli prestazionali superiori o uguali ai limiti di accettazione.
Questo parametro viene anche identificato con la **durata spontanea** dell'elemento tecnico considerato, ovvero come il periodo di tempo durante il quale le prestazioni del componente si mantengono entro limiti accettabili per le esigenze di servizio, sotto la sola influenza degli agenti sollecitanti; il valore determinato va dunque interpretato come periodo di tempo durante il quale l'elemento tecnico svolge le funzioni per le quali è stato progettato **in assenza di interventi di manutenzione**.
In termini probabilistici, la durata di un componente edilizio può essere ben rappresentata dalla media μ di una distribuzione "normale" o "Gaussiana"; tale distribuzione, infatti, è proprio quella che meglio rappresenta il comportamento a guasto di elementi tecnici giunti al termine del loro ciclo di vita.
Per osservazioni svolte su campioni abbastanza numerosi di popolazione, infatti, la funzione "densità di probabilità" di guasto, f(t), coinciderà con buona approssimazione con la distribuzione delle frequenze p(t),

$$p(t) = \frac{n_t}{N}$$

dove:

n_t: numero di elementi del campione che hanno subìto un guasto fino all'istante t_i compreso;
N: numero complessivo di elementi del campione esaminato;
p(t): distribuzione delle frequenze.

La funzione "densità di probabilità" è tale che la probabilità infinitesima P_T che l'elemento tecnico, giunto al termine del suo ciclo di vita, si guasti al tempo t o nel suo intorno infinitesimo $t + \delta t$ sia:

$$P_T = f(t)dt$$

Tale probabilità è rappresentata dall'area tratteggiata nel grafico di **fig. 2.1**.
Si può notare come la probabilità di guasto dell'elemento tecnico sia massima proprio nell'intorno del valore medio μ che, date le proprietà di simmetria della Gaussiana, coincide anche con la moda e con la mediana.

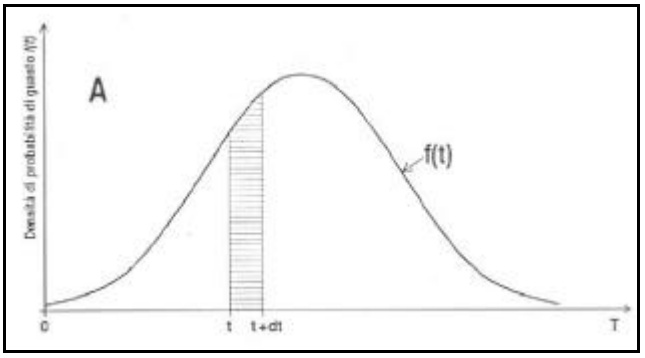

Fig. 2.1 –Funzione "densità di probabilità" di guasto f(t) in un intervallo di tempo dt

Dal momento che ogni elemento finirà comunque con guastarsi nel tempo, l'area sottesa alla funzione f(t) sarà uguale all'unità (**fig. 2.2**), e cioè:

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = 1$$

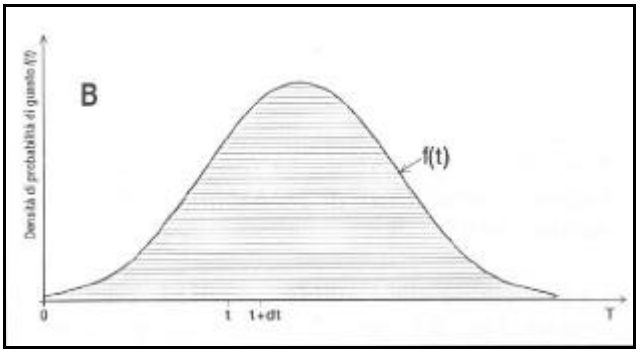

Fig. 2.2 –Funzione "densità di probabilità" di guasto f(t) al termine del ciclo di vita

La probabilità che l'elemento tecnico si guasti in un qualunque istante inferiore o uguale a t è data dalla funzione di "distribuzione cumulativa", che potremo indicare con F(t).
Tale funzione è data dalla seguente formula:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

La **fig. 2.3** evidenzia come la probabilità di guasto dell'elemento tecnico in un istante qualsiasi t del suo ciclo di vita sia rappresentata dall'area sottesa alla funzione, che dunque aumenta col passare del tempo.

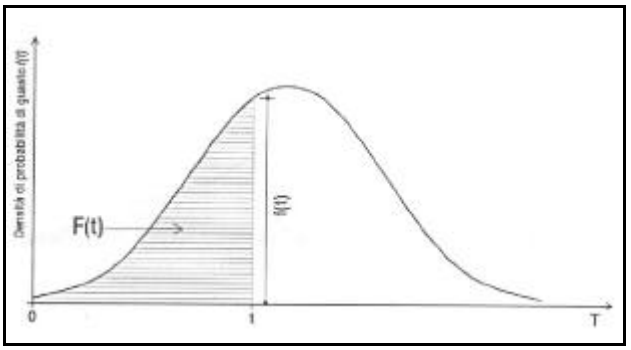

Fig. 2.3 –Funzione "distribuzione cumulativa" di probabilità di guasto F(t) all'istante t

2.2 Affidabilità

L'affidabilità di un elemento tecnico (o di un sistema di elementi) è la probabilità che il sistema o l'elemento funzioni senza guastarsi ad un livello predisposto, per un certo tempo t e in predeterminate condizioni ambientali, ovvero la probabilità dell'oggetto edilizio (elemento tecnico, subsistema tecnologico) di mantenere sensibilmente invariata nel tempo la propria qualità secondo definite condizioni d'uso.
Statisticamente parlando, la probabilità che l'elemento tecnico continui a funzionare dopo il tempo t è data dal complemento a 1 della funzione "distribuzione cumulativa" di probabilità di guasto (**fig. 2.4**).
In formule,

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt$$

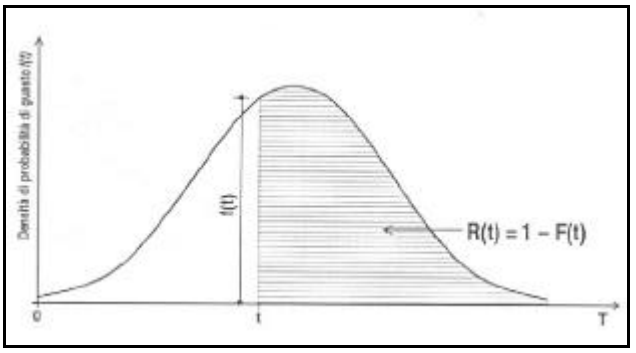

Fig. 2.4 –Funzione "affidabilità" R(t) all'istante t

2.3 Il tasso di guasto

Il "tasso di guasto" esprime, per un dato repertorio di elementi tecnologicamente omogenei, il numero di guasti che avvengono nell'unità di tempo ed é detto anche affidabilità istantanea.

Esso è tale che il prodotto

$$\lambda(t)dt$$

rappresenta *la probabilità che l'elemento si guasti in un tempo compreso tra t e t+dt, condizionata al fatto che l'elemento tecnico sia sopravvissuto fino al tempo t.*
La funzione "tasso di guasto" rappresenta allora la funzione "densità di probabilità" che un elemento, sopravvissuto fino al tempo t, si guasti nel successivo intervallo δt.
La differenza tra la funzione "densità di probabilità" f(t) precedentemente individuata, e la funzione "tasso di guasto" $\lambda(t)$ consiste nel fatto che:

- $f(t)\delta t$ rappresenta la frazione di una popolazione di componenti che si rompe in un intervallo $(t, t+\delta t)$, riferendosi ad una *popolazione sana al tempo t = 0.*
- $\lambda(t)\delta t$ rappresenta la frazione di una popolazione di componenti che si rompe sempre nello stesso intervallo $(t, t+\delta t)$, riferendosi però ha una *popolazione sana al tempo t*, che sarà meno numerosa o, al massimo, uguale alla popolazione originaria considerata al tempo t = 0.

Si può quindi affermare che la probabilità e elementare $\lambda(t)\delta t$ è una probabilità *"a posteriori"*, ossia condizionata dall'esistenza dell'informazione certa che il componente ha continuato a funzionare fino al tempo t, mentre la probabilità elementare $f(t)\delta t$ è una probabilità *"a priori"*, cioè relativa all'istante iniziale del funzionamento.
Si può anche osservare che, essendo $\lambda(t)\delta t$ = probabilità istantanea di guasto $(0 < P < 1)$,

$$\lambda(t) = \frac{P}{dt}$$

Il "tasso di guasto" $\lambda(t)$ ha le dimensioni dell'inverso di un tempo. Può allora essere interpretato come *"numero di guasti nell'unità di tempo"*, quindi come *velocità* o *intensità* del verificarsi di un guasto.
Esaminando il comportamento nel tempo di una popolazione di componenti o di un campione statistico di tale popolazione, ciascun elemento della quale possa indicativamente assumere solo due stati ("funzionante" o "guasto"), si possono notare andamenti caratteristici per le varie funzioni di affidabilità.
In particolare è l'andamento della funzione "tasso di guasto" a descrivere, in modo particolarmente significativo, l'evolvere del ciclo di vita del componente.
Se si ha a che fare con elementi tecnici non bistabili[9], il "tasso di guasto" ha un andamento molto simile a quello di **fig. 2.5**.
Nella gran parte dei casi si può rilevare la presenza di *tre fasi distinte*, caratterizzate da un diverso andamento dei valori della funzione "tasso di guasto":

[9] Gli elementi tecnici bistabili sono quelli per cui si ha un brusco passaggio dallo stato di funzionamento allo stato di guasto (cfr. elementi di impianti tecnici).

1) Fase di *"mortalità infantile"* o fase di *"rodaggio"*, nella quale si registra la presenza di guasti iniziali dei componenti legati a difetti originari dei materiali, a rilevanti difetti di montaggio o posa in opera, a errori o difetti di fabbricazione. Il "tasso istantaneo di guasto" tende progressivamente a decrescere in seguito all'eliminazione dei componenti intrinsecamente deboli e quindi con un "tasso di guasto" superiore a quello medio della popolazione. Ciò conduce ad una progressiva stabilizzazione del "tasso di guasto" stesso;
2) Fase di "*vita utile*", nella quale si registra la presenza dei soli guasti casuali, legati ad eventi imprevisti o ad imperfezioni del processo produttivo rispetto alle prestazioni previste dal progetto o, ancora, ad usi impropri del componente edilizio. In questa fase il "tasso di guasto" mantiene un valore sostanzialmente costante nel tempo;
3) Fase di "*usura accelerata*", nella quale (oltre ai perduranti guasti casuali) si registrano guasti da usura legati all'inevitabile invecchiamento del componente edilizio, la cui durata di vita viene a volte prevista già in sede di progetto.

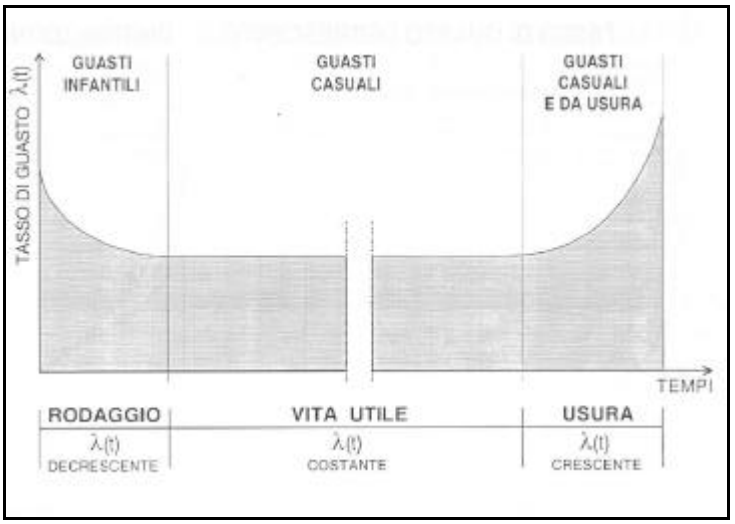

Fig. 2.5 –Tasso di guasto caratteristico di elementi tecnici non bistabili

Per concludere, la **figura 2.6** mostra sinotticamente la collocazione dei parametri di valutazione della durabilità all'interno della qualità tecnologica.

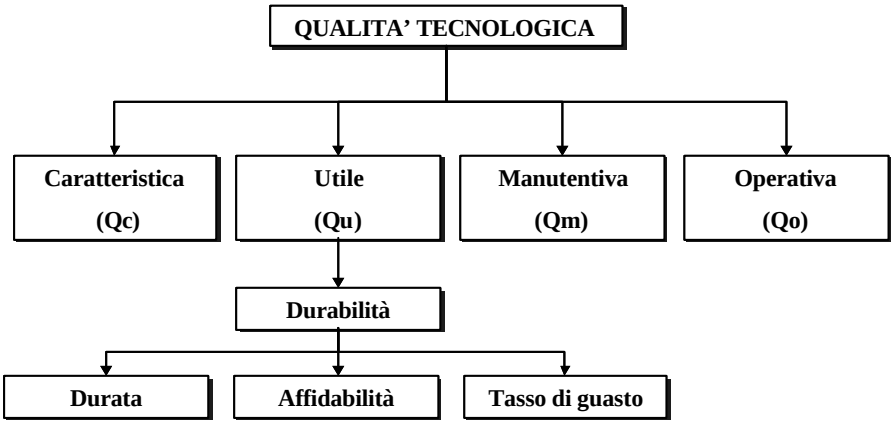

Fig. 2.6 – I parametri di valutazione della durabilità

Cap. 3 – Il quadro normativo internazionale

Negli ultimi anni c'è stata un'attenzione sempre crescente al bisogno di determinare durabilità e vita utile di materiali, componenti, impianti, strutture, nonché di edifici nella loro totalità.
Questo in seguito a due motivi fondamentali:

- **Problemi ambientali:** la scarsità di materiali e risorse energetiche hanno spinto il settore delle costruzioni ad affrontare tali tematiche, dal momento che quest'ultimo si presenta come uno dei principali consumatori di risorse. Inoltre, l'impatto ambientale causato dagli edifici ha assunto nel tempo sempre maggior rilevanza;

- **Problemi economici:** come già detto in precedenza, il valore economico delle opere costruite (siano essi edifici di qualunque tipo, o anche opere infrastrutturali) assume sempre maggiore rilevanza nella coscienza dell'utente/committente (pubblica amministrazione, società o privati). Le condizioni dell'opera durante l'intero arco della sua vita, i costi annuali di gestione e manutenzione e quindi l'intero costo del ciclo di vita risultano di fondamentale importanza per l'economia di un Paese, o per il mantenimento della competitività all'interno di un determinato settore.

L'importanza dei suddetti aspetti si è nel tempo tradotta in una serie di attività ed iniziative a livello sia nazionale che internazionale.
Alcune di queste verranno brevemente menzionate nelle pagine successive.

3.1 L'attività internazionale, dalla Direttiva 89/106/EEC allo standard ISO 15686

1988

Construction Product Directive – 89/106/EEC [EU 1988]

La nostra analisi del quadro normativo internazionale può essere senz'altro fatta partire dal 1988, hanno di adozione, da parte della Unione Europea, della Direttiva "Prodotti da Costruzione" [EU 1988].
Il documento si applica ai materiali da costruzione e riguarda la loro libera circolazione, immissione sul mercato o utilizzazione all'interno dei Paesi membri. Punto focale della Direttiva è l'introduzione dei cosiddetti "requisiti essenziali"; i prodotti da costruzione, infatti, possono essere immessi sul mercato solo se idonei all'impiego previsto, se hanno cioè caratteristiche tali che le opere possano soddisfare i requisiti essenziali di cui sopra. L'allegato I della Direttiva si occupa proprio della definizione di tali requisiti, che "devono essere soddisfatti per una durata di esercizio economicamente ragionevole" (art. 3, par. 1).

"

1. ***Resistenza meccanica e stabilità***

   L'opera deve essere concepita e costruita in modo che le azioni cui può essere sottoposta durante la costruzione e l'utilizzazione non provochino:
   a) *Il crollo dell'intera opera o di una sua parte;*

b) *Deformazioni di importanza inammissibile;*
c) *Danni ad altre parti dell'opera o alle attrezzature principali o accessorie in seguito ad una deformazione di primaria importanza degli elementi portanti;*
d) *Danni accidentali sproporzionati alla causa che li ha provocati.*

2. Sicurezza in caso di incendio

L'opera deve essere concepita e costruita in modo che, in caso di incendio:

a) *La capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato;*
b) *La produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere siano limitate;*
c) *La propagazione del fuoco ad opere vicine sia limitata;*
d) *Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti;*
e) *Sia presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso.*

3. Igiene, salute e ambiente

L'opera deve essere concepita e costruita in modo da non compromettere l'igiene o la salute degli occupanti o dei vicini e in particolare in modo da non provocare:

a) *Sviluppo di gas tossici;*
b) *Presenza nell'aria di particelle o di gas pericolosi;*
c) *Inquinamento o tossicità dell'acqua o del suolo;*
d) *Difetti nell'eliminazione delle acque di scarico, dei fumi e dei rifiuti solidi o liquidi;*
e) *Formazione di umidità su parti o pareti dell'opera.*

4. Sicurezza nell'impiego

L'opera deve essere concepita e costruita in modo che la sua utilizzazione non comporti rischi di incidenti inammissibili quali scivolate, cadute, collisioni, bruciature, folgorazioni, ferimenti a seguito di esplosioni.

5. Protezione contro il rumore

L'opera deve essere concepita e costruita in modo che il rumore cui sono sottoposti gli occupanti e le persone situate in prossimità si mantenga a livelli che non nuocciano alla loro salute e tali da consentire soddisfacenti condizioni di sonno, di riposo e di lavoro.

6. Risparmio energetico e ritenzione di calore

L'opera ed i relativi impianti di riscaldamento, raffreddamento ed aerazione devono essere concepiti e costruiti in modo che il consumo di energia durante l'utilizzazione dell'opera sia moderato, tenuto conto delle condizioni climatiche del luogo, senza che ciò pregiudichi il benessere termico degli occupanti."

Accanto ai requisiti essenziali viene introdotto anche il marchio CE, fondamentale per la libera circolazione dei prodotti da costruzione. Il marchio CE attesta, fondamentalmente, che i prodotti da costruzione sono conformi alle relative norme nazionali in cui sono state trasposte le norme armonizzate, che sono conformi ad un benestare tecnico europeo[10], o che sono conformi alle specificazioni tecniche nazionali nella misura in cui non esistano specificazioni armonizzate (art. 4, par. 2).
Nello stesso anno, la Commissione istituisce un'organizzazione composta da organismi autorizzati al rilascio di benestare tecnici europei, ed impartisce a tale organizzazione (che raggruppa gli organismi riconosciuti designati dagli stati membri) mandati per l'elaborazione di orientamenti per il benestare tecnico europeo per un prodotto o una famiglia di prodotti.
Più in generale, dunque, al fine di rendere operativa la Direttiva "Prodotti da Costruzione", la Comunità Europea ha emesso una serie di mandati ai gruppi di lavoro normativo, in ambito EOTA[11] per la predisposizione di Guide per l'Idoneità Tecnica Europea[12], ed in ambito CEN[13] per la predisposizione di norme armonizzate hEN; in questi mandati è prevista la valutazione della durabilità dei prodotti per la costruzione, relativamente alle caratteristiche prestazionali dei prodotti che contribuiscono al soddisfacimento dei requisiti essenziali per le opere.
Viene inoltre fatto carico ai comitati tecnici cui partecipano gli stati membri, di elaborare Documenti Interpretativi.
Il principale obiettivo di tali documenti è quello di stabilire un legame tra i requisiti essenziali ed i mandati che la Commissione assegna da un lato agli enti normatori europei per stabilire standard armonizzati hEN e dall'altro all'EOTA per stabilire delle linee guida per i benestare tecnici europei.
In particolare (art.12, par. 2),

"… i Documenti Interpretativi:

a) Precisano i requisiti essenziali previsti all'articolo 3 e definiti nell'allegato I, armonizzando la terminologia ed i concetti tecnici di base e indicando le categorie o i livelli per ciascun requisito laddove ciò sia necessario e lo sviluppo delle conoscenze scientifiche e tecniche lo consenta;
b) Indicano metodi di correlazione tra detti livelli o categorie di requisiti e le specificazioni tecniche di cui all'articolo 4: metodi di calcolo e di determinazione, norme tecniche di concezione delle opere, ecc.;
c) Costituiscono riferimento per la definizione di norme armonizzate e di orientamenti per il benestare tecnico europeo, nonché per l'accettazione di specificazioni tecniche nazionali ai sensi dell'articolo 4, paragrafo 3."

Il recepimento della Direttiva da parte dei Paesi membri obbligherà dunque i produttori del settore della costruzione che vorranno distribuire con il marchio CE i loro prodotti nei Paesi della Comunità Europea, ad adeguarsi ad una procedura di Certificazione (Attestazione di Conformità) che comprenderà, tra le altre, prove di valutazione di durabilità, sia all'inizio della procedura di rilascio, sia durante il processo produttivo: questo al fine di garantire i livelli di qualità (e quindi anche di durabilità) del prodotto specificati e dichiarati con il marchio CE.

[10] ETA – European Technical Approval
[11] EOTA – European Organization for Technical Approvals
[12] ETAG – European Technical Approval Guidelines
[13] CEN – European Committee for Standardization

1989

Raccomandazione RILEM[14] [RILEM 1989]

Proprio al fine di venire incontro alle esigenze dei produttori di materiali e componenti edilizi (che dovranno individuare metodi sistematici per stimare il probabile rischio di degrado prematuro dei prodotti esistenti in particolari condizioni di riferimento o le più vulnerabili condizioni di esposizione dei loro prodotti), nel 1989 è stata sviluppata una metodologia che prevede un approccio sistematico per la predizione di vita utile dei materiali e dei componenti edilizi [RILEM 1989]. Tale metodologia, basata su requisiti generali, include l'identificazione delle informazioni necessarie, la selezione e lo sviluppo delle prove, l'interpretazione dei dati e l'analisi dei risultati. Dal momento che utilizza un approccio di ricerche iterativo, permette predizioni sempre più precise mano a mano che la conoscenza in tale campo aumenterà. Le analisi matematiche necessarie per la predizione di vita utile non sono descritte nel dettaglio, ma possono essere utilizzate analisi deterministiche o probabilistiche.
La Raccomandazione RILEM è stata appositamente sviluppata in modo generico, per poter essere applicata a tutti i tipi di materiali e componenti edilizi, ed è stata usata come base per lo sviluppo di successive normative e standard sovrannazionali.

Già nel 1987, mostrando notevole lungimiranza, Masters forniva alcuni requisiti generali per un sistema di predizione di vita utile [Masters 1987].

"

1. *È necessario definire il problema esplicitamente, prima di cercare di risolverlo;*

2. *Andrebbe definita la vita utile in modo tale che:*

    a. *Possa essere misurata quantitativamente;*
    b. *Possa essere messa in relazione con le prestazioni fornite in servizio;*

3. *Bisognerebbe aprirsi ad approcci e metodi nuovi, piuttosto che accettare ciecamente approcci e metodi tradizionali;*

4. *Andrebbero utilizzate procedure semplici e sistematiche, aventi basi nella logica, nel senso comune e nella scienza dei materiali;*

5. *Andrebbe posta molta attenzione ai dati ottenuti da test d'invecchiamento accelerato qualitativi e non sistematici, in quanto potrebbero fornire indicazioni buone, cattive o indifferenti;*

6. *Bisogna tenere conto del fatto che:*

    a. *E' impossibile simulare tutti i possibili carichi ambientali in laboratorio;*
    b. *In ogni caso non è necessario farlo;*

7. *E' necessario assicurarsi che i processi di degrado indotti da test accelerati siano gli stessi di quegli incontrati nella realtà;*

[14] RILEM – International Association for Building Materials and Structures

8. *Andrebbero misurati i fattori di degrado;*

9. *E' necessario porre molta attenzione alla trappola della correlazione;*

10. *Bisogna tenere conto del fatto che, attraverso procedure sistematiche e quantitative, possono essere sviluppati validi test d'invecchiamento accelerato."*

1992

BS 7543:1992[15]

Nel Regno Unito viene pubblicato dal BSI[16] uno standard nazionale sulla predizione di durabilità e vita utile di elementi, prodotti e componenti edilizi, divenuto ben presto riferimento per tutta una serie di altri lavori a livello internazionale.
La BS 7543:1992 tratta problemi di predizione di durabilità e vita utile, affermando che il progettista ha bisogno di informazioni sulla durabilità per poter soddisfare i requisiti del committente e sviluppare quindi una razionale politica della durabilità.
L'informazione necessaria può essere ottenuta da:

- Esperienza nell'uso di materiali tradizionali;
- Certificati che stimino le prestazioni dei prodotti;
- Pubblicazioni di ricerche;
- Predizioni di vita utile di prodotti fornite dai produttori.

Il codice, tra le altre cose, introduce il concetto di "required service life", intesa come vita utile specificata per andare incontro ai requisiti dell'utente e definita dal committente stesso.
Il progettista dovrà poi essere in grado di tradurre le richieste del proprietario in parametri quantitativi definiti a monte del progetto per quel che riguarda l'edificio nella sua interezza e nelle sue parti, a seconda delle difficoltà di intervento nel caso di riparazione o sostituzione.
Nel capitolo 3 ("Requisiti di durabilità") viene compiuto uno sforzo per definire requisiti quantitativi per la vita utile di edifici (cfr. **tab. 3.1**) e delle loro parti (cfr. **tab. 3.2**).

Category	Description	Building life for category	Examples
1	Temporary	Agreed period up to 10 years	Non-permanent site huts and temporary exhibition buildings
2	Short life	Minimum period 10 years	Temporary classrooms; buildings for short life industrial processes; office internal refurbishment, retail and warehouse buildings; (See note 1.)
3	Medium life	Minimum period 30 years	Most industrial buildings; housing refurbishment
4	Normal life	Minimum period 60 years	New health and educational buildings; new housing and high quality refurbishment of public buildings
5	Long life	Minimum Period 120 years	Civic and other high quality buildings

NOTE 1 Specific periods may be determined for particular buildings in any of categories 2 to 5, provided they do not exceed the period suggested for the next category below on the table: for example many retail and warehouse buildings are designed to have a service life of 20 years.
NOTE 2 Buildings may include replaceable and maintainable components (see Table 3).

Tab. 3.1 – Categorie di design life per edifici

[15] BS 7543:1992 *Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components*
[16] BSI – British Standard Institute

Category	Description	Life	Typical examples
1	Replaceable	Shorter life than the building life and replacement can be envisaged at design stage	Most floor finishes and service installation components
2	Maintainable	Will last, with periodic treatment, for the life of the building	Most external claddings, doors and windows
3	Lifelong	Will last for the life of the building	Foundations and main structural elements

Tab. 3.2 – Categorie di design life per componenti o sistemi edilizi

Nello standard trovano inoltre spazio ulteriori affermazioni riguardo la predizione della durabilità:

“

4. Predizioni di durabilità

Un progettista deve poter disporre di informazioni sulla durabilità per poter soddisfare requisiti del committente e sviluppare una razionale politica della durabilità dell’intera opera.

* * *

È importante notare le seguenti cose:

a) La predizione di durabilità è soggetta a molte variabili e non può essere una scienza esatta.

Ogni nuovo edificio è un progetto a se stante, soggetto a specifiche condizioni di uso e localizzato in uno specifico sito. Dal momento che tali condizioni non sono le stesse di tutti gli edifici precedentemente costruiti, la vita predetta per l’edificio e le sue parti può solo essere data da una stima.

b) Test d’invecchiamento accelerato sui componenti di per sé possono raramente essere utilizzati per dare un’accurata base di predizione di vita utile. Prove a breve termine inoltre non sono generalmente utilizzabili per grandi insiemi di componenti.

c) Certificati di prove rilevanti non sono sempre disponibili dai produttori e potrebbero essere stati ottenuti da prove su progetti specifici.

* * *

9. Predicted service life
9.1. Metodi di stima

La “predicted service life” di un edificio dovrebbe essere stimata in uno o più dei seguenti modi:

- *Stima ottenuta dal confronto con precedenti esperienze con la stessa costruzione o con costruzioni simili, in simili località o contesti climatici;*

- *Stima ottenuta dalla misurazione del tasso naturale di degrado durante un breve periodo di uso o di esposizione e stima, da tali misurazioni, di quando sarà raggiunto il limite di durabilità;*
- *Stima ottenuta da interpolazioni di prove accelerate condotte per ridurre il tempo di risposta all'azione di un agente. La scienza delle prove accelerate è complessa: bisognerebbe fare attenzione a non produrre differenti effetti a causa del cambiamento dell'intensità degli agenti.*

* * *

La predizione di vita utile sarà normalmente applicata a componenti ed insiemi di componenti su piccola scala. Intere opere ed insiemi di componenti edilizi su larga scala rappresentano molto spesso progettazioni a se stanti, che rendono le precedenti esperienze di durabilità meno rilevanti e, a causa della loro dimensione, le loro prestazioni in condizioni controllate risultano meno facili da testare.

Qualunque metodo venga utilizzato per stimarla, la vita utile predetta è raramente data da un valore preciso, dal momento che gli effetti di un'azione in ogni edificio non sembrano essere accuratamente prevedibili. Predizioni più affidabili possono essere svolte quando c'è una correlazione tra i risultati di stime differenti."

[BIA[17] 1992]

Nello stesso anno viene pubblicato in Nuova Zelanda un nuovo "building code" [BIA 1992], che contiene requisiti specifici per la vita utile di varie parti di un edificio o di singoli prodotti da costruzione. Nel paragrafo B2 ("Durabilità") i requisiti vengono forniti nella seguente maniera:

"B.2.3 Dal momento in cui viene rilasciato un certificato di conformità al codice, gli elementi edilizi dovranno continuare a soddisfare le prestazioni di tale codice sotto normali condizioni manutentive, per la minore tra; la specificata vita utile dell'edificio (se ve n'è una), oppure:

a) Per la struttura, inclusi elementi edilizi come pavimenti e muri che forniscono stabilità strutturale; essendo la vita dell'edificio non inferiore a 50 anni;
b) Per parti il cui accesso è difficoltoso e per zone nascoste dell'involucro esterno e strutture collegate all'edificio; essendo la vita dell'edificio non inferiore a 50 anni;
c) Per altre zone dell'involucro edilizio e delle strutture collegate, per l'involucro edilizio ed altri elementi edilizi caratterizzati da una moderata facilità di accesso ma difficili da sostituire: 15 anni;
d) Per rivestimenti, elementi protettivi rinnovabili, guarnizioni ed altri elementi edilizi per i quali è possibile un rapido accesso: 5 anni."

[17] BIA – Building Industry Authority

1993

Principal Guide (AIJ)

In Giappone già da anni si svolgeva un lavoro considerevole su come trattare metodi di predizione di vita utile di materiali ed opere edilizie sia nella fase di pianificazione che in quella di gestione degli edifici. Il risultato di questi sforzi si è tradotto nella pubblicazione della "Principal guide for service life planning of buildings", riedita in una breve versione in inglese qualche anno più tardi a cura dell'AIJ[18] [AIJ 1993].
Tale guida ebbe il merito di mettere in luce le problematiche principali correlate alla durabilità nelle diverse fasi del processo edilizio, come ad esempio la pianificazione dell'intervento, la progettazione, la costruzione, l'esercizio, la manutenzione e la demolizione (o recupero).

1994

Interpretative Documents [EU 1994]

Nel 1994 la Commissione pubblica nella serie C della Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee i Documenti Interpretativi previsti dalla Direttiva Prodotti da Costruzione (89/106/EEC), per dare forma concreta ai requisiti essenziali definiti nell'Allegato I della Direttiva stessa. Il principale obiettivo dei Documenti Interpretativi è quello di stabilire un collegamento tra i requisiti essenziali e i mandati che la Commissione ha dato da un lato ai corpi di standardizzazione europei (CEN/CENELEC) per produrre standard armonizzati (hEN) e dall'altro all'Organizzazione Europea per i Benestare Tecnici (EOTA) per stabilire Linee Guida per i Benestare Tecnici Europei (ETAG).
Il primo problema che viene affrontato nei documenti è quello di definire cosa si intenda per "durata di esercizio economicamente ragionevole". In tutti i Documenti Interpretativi vengono fornite le seguenti definizioni, dove col termine "Working Life" si intende la vita utile o di esercizio di un'opera o delle sue parti:

"1.3.5 Working life economicamente ragionevole

1. *La working life è il periodo di tempo durante il quale le prestazioni dell'opera saranno mantenute a un livello compatibile con il soddisfacimento dei requisiti essenziali;*
2. *Una working life economicamente ragionevole presume che siano tenuti in considerazione tutti gli aspetti rilevanti, come ad esempio: così di progettazione, costruzione ed utilizzo; costi che potrebbero nascere da problemi di utilizzo; rischi e conseguenze di guasti dell'opera durante la sua working life e costi di assicurazioni che coprano tali rischi; rinnovamenti parziali pianificati; costi di ispezione, manutenzione e riparazione; costi operativi ed amministrativi; vendita; aspetti ambientali."*

I Documenti Interpretativi inoltre contengono i seguenti commenti riguardo working life e durabilità:

[18] AIJ – Architectural Institute of Japan

"5.1 Trattamento di working life di edifici in relazione ai requisiti essenziali

1. *E' in capo agli stati membri, quando e dove lo ritengano necessario, prendere misure concernenti la working life che possa essere considerata ragionevole per ogni tipo di opera, per alcune opere, per parti di esse, in relazione al soddisfacimento dei requisiti essenziali;*
2. *Qualora informazioni concernenti la durabilità delle opere in relazione ai requisiti essenziali siano collegate alle caratteristiche dei prodotti, i mandati per la preparazione degli standard europei e le linee guida per i benestare tecnici europei correlati con questi prodotti, dovranno coprire anche aspetti di durabilità.*

5.2 Trattamento di working life di prodotti da costruzione in relazione ai requisiti essenziali

1. *Le specificazioni di categoria B e le linee guida per i benestare tecnici europei dovrebbero includere indicazioni concernenti la working life dei prodotti in relazione all'uso per i quali sono stati progettati e i metodi per la loro stima;*
2. *Le indicazioni date sulla working life di un prodotto non possono essere integrate come garanzia data dal produttore, ma vanno considerate solamente come un'indicazione per scegliere i prodotti più adatti in relazione alla working life economicamente ragionevole delle opere."*

Nello stesso anno, Brand [1994] ha descritto l'importanza di specificare la vita utile di varie parti di un edificio in modo tale che ogni parte possa essere facilmente riparata o sostituita, se la sua vita utile è più breve di quella dell'edificio stesso. La relazione tra le varie vite utili è stata illustrata da linee di differente spessore, come mostrato in **figura 3.3**.

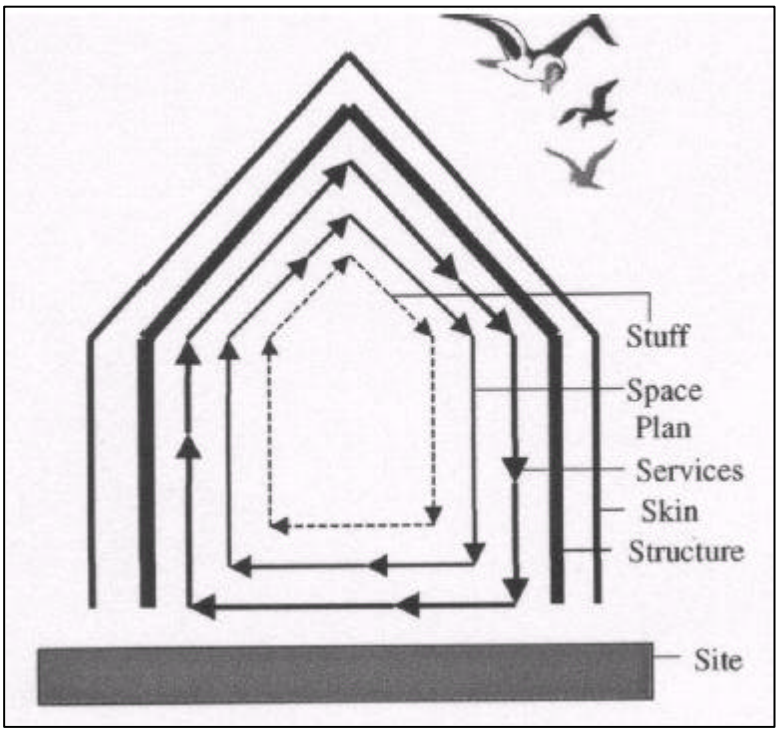

Fig. 3.3 – Relazione ottimale tra le vite utili di differenti componenti edilizi e le loro funzioni

Sempre nel 1994, Martin ed altri hanno condotto uno studio sulle metodologie per predire la vita utile di sistemi di rivestimento [Martin *et al*. 1994]. Nel loro lavoro presentano una serie di criteri per giudicare l'adeguatezza di ogni metodologia per la predizione di vita utile proposta. Questi criteri includono la capacità di:

"

1. *Maneggiare una larga variabilità dei tempi di guasto per campioni nominalmente identici;*
2. *Analizzare dati estremamente vari;*
3. *Discriminare tra queste variabili. Ciò significa che la metodologia di predizione di vita utile dovrebbe essere in grado di separare le variabili più significative da quelle meno importanti;*
4. *Adattare modelli di guasto sia empirici che meccanicistici a risultati di esposizioni basati su prove di invecchiamento accelerato;*
5. *Stabilire un collegamento tra risultati ottenuti con prove a lungo termine (in servizio) e a breve termine (in laboratorio);*
6. *Fornire tecniche matematiche per predire la vita utile di sistemi di rivestimento esposti in ben definiti ambienti d'uso."*

1995

CSA 478-95[19]

Il 1995 vede la pubblicazione della normativa canadese CS 478-95 ad opera del CSA[20]. In tale standard si ritrova la descrizione generale dei metodi di predizione di vita utile.
I metodi alternativi sono descritti nella seguente maniera:

"

7. Predicted service life di componenti e sistemi
7.1 Generale

È noto che la predicted service life di ogni componente edilizio, sia riparato che nuovo, è approssimativamente basata sulle condizioni ambientali assunte e sulle procedure di installazione, uso e manutenzione.

7.2 Metodi di predizione della vita utile
7.2.1
La predicted service life di componenti o sistemi potrebbe essere stimata da uno più dei seguenti metodi:

a) Dimostrata efficacia, in accordo col paragrafo 7.3;
b) Modellazione dei processi di degrado, in accordo col paragrafo 7.4;
c) Testing, in accordo col paragrafo 7.5.

7.2.2
Tutti i metodi usati per determinare la predicted service life dovrebbero essere basati sulla chiara comprensione ed applicazione dei principi di scienza delle costruzioni, in accordo col paragrafo 7.6.

[19] CSA S478-1995 *Guideline on durability in buildings*
[20] Canadian Standard Authority

7.2.3

Per la predizione di vita utile di un componente di un sistema:

a) La dimostrata efficacia dovrebbe essere applicata dove sistemi identici sono stati utilizzati:
   I. Con successo, e
   II. Nello stesso contesto ambientale.

b) La modellazione e la dimostrata efficacia dovrebbero essere applicati dove:
   I. Un componente o sistema simile è stato utilizzato con successo nello stesso contesto ambientale; oppure
   II. Componenti o sistemi provati sono stati utilizzati con successo, ma in contesti ambientali leggermente differenti; e

c) Modellazione e testing dovrebbero essere applicati dove:
   I. Devono essere usati componenti e sistemi innovativi;
   II. Componenti o sistemi provati devono essere utilizzati in contesti ambientali significativamente differenti.

Il grado in cui un sistema o le sue componenti sono innovativi o il contesto ambientale è dissimile da uno precedentemente studiato, dovrebbe essere stabilito dall'applicazione dei principi della scienza delle costruzioni."

Un workshop RILEM sugli aspetti ambientali di materiali e strutture edilizie si svolge in Finlandia nel settembre dello stesso anno. In un breve sommario si conclude che:

"Gli aspetti ambientali danno origine ad un'area veramente complessa, con molti fattori che devono essere inclusi nella valutazione. Questo, tipicamente, si traduce in valutazioni complicate e metodologie di stima difficoltose da applicare."

* * *

"Al momento non c'è una metodologia standard per stimare i problemi ambientali lungo l'intero processo edilizio e durante il ciclo di vita dei prodotti edilizi. Le metodologie in uso oggi sono incomplete, e potrebbero portare a risultati contraddittori. Molti dei metodi di stima applicati si concentrano solo su determinati aspetti delle prestazioni ambientali totali".

In seguito a queste conclusioni, viene sancito il grande bisogno di metodologie di progettazione e metodi che siano in grado di analizzare, valutare ed ottimizzare impatti ambientali insieme ad altri requisiti prestazionali.

1996

Sarja e Vesikari [1996] pubblicano un report RILEM sulla progettazione della durabilità di strutture in calcestruzzo. Presentano inoltre una discussione di ciò che loro chiamano modelli durabilistici; tali modelli potrebbero essere:

- **Modelli di degrado** – presentazioni matematiche che mostrano un incremento del degrado in funzione del tempo e di appropriati parametri progettuali;
- **Modelli prestazionali** – presentazioni matematiche che mostrano decadimenti prestazionali in funzione del tempo e di appropriati parametri progettuali;

- **Modelli di vita utile** – presentazioni matematiche che mostrano la vita utile di una struttura in funzione di differenti parametri progettuali.

Gli autori affermano che ci potrebbero essere modelli di durabilità per differenti livelli di complessità prestazionale come materiali, elementi strutturali ed organismi edilizi, e tutti questi possono essere utilizzati nella progettazione della durabilità. Successivamente affermano che:

"7.1.2 Modelli di durabilità deterministici e stocastici

I modelli di durabilità possono inoltre essere divisi in modelli deterministici o stocastici. Modelli di durabilità deterministici sono utilizzati nella progettazione della durabilità deterministica, dove la dispersione del degrado (o delle prestazioni o della vita utile) non è presa in considerazione. Con valori noti dei parametri il modello restituisce solamente un valore (di degrado, o delle prestazioni, o della vita utile) che spesso è il valore medio. In molti casi, modelli deterministici vengono formulati per dare un frattile superiore o inferiore invece del valore medio.

In molti casi l'informazione restituita da modelli deterministici è sufficiente a valutare il rischio di non raggiungimento della vita utile obiettivo. Specialmente nella progettazione meccanica delle strutture, metodi di progettazione stocastica sono considerati essenziali dal momento che la dispersione dovuta al degrado è normalmente ampia e il grado di rischio potrebbe essere elevato."

Nel report viene inoltre data la seguente valutazione riguardo ai modelli di durabilità:

"7.2.2 Quantificazione del degrado, delle prestazioni, e della vita utile

Il passaggio finale nel processo di produzione di modelli probabilistici è la quantificazione e la formulazione. Metodi statistici e ragionamenti teorici sono gli strumenti utilizzati per questo compito. Semplificazioni, omissioni di fattori rilevanti e limitazioni di tali fattori sono spesso azioni necessarie.

I modelli di durabilità possono essere basati su fattori empirici o analitici.

I modelli empirici sono basati sull'esperienza e sui risultati dei test. Sono sviluppati a partire da risultati di osservazioni sul campo e di test di laboratorio, applicando correlazioni ed altri metodi statistici.

I modelli analitici invece sono basati sulle leggi della natura e su ragionamenti fondamentali; sono creati a partire da un'approfondita analisi dei meccanismi di degrado. Prima che i modelli possano essere applicati, sono generalmente richiesti test per la determinazione dei valori relativi a determinate proprietà dei materiali.

Molto spesso, i modelli empirici rappresentano il punto di vista dell'ingegnere, e i modelli analitici quello degli scienziati dei materiali. Un difetto del modelli empirici è che i meccanismi di influenza sono difficilmente compresi nei modelli. Conseguentemente, ogni deviazione dai limiti del modello potrebbe non risultare possibile a meno di introdurre rischi. I metodi analitici sono basati su una profonda comprensione delle caratteristiche del danno,

ma la loro importanza pratica potrebbe essere piccola se i parametri nel modello non sono misurabili o se i modelli non possono essere portati ad un livello di utilizzazione pratica.
Entrambi i punti di vista (empirico ed analitico) dovrebbero essere considerati quando si sviluppano modelli di durabilità. I modelli possono essere considerati buoni quando si basano su analisi dei meccanismi dei fattori che portano al degrado, e comunque soggetti anche a test di laboratorio e sul campo.

Joint CIB W080/RILEM TC 175 "SLM"

Va inoltre segnalato, nel 1996, il joint tra CIB[21] e RILEM, che ha dato origine alla commissione CIB W080/RILEM TC-175 "SLM"[22], il cui scopo è quello di favorire lo sviluppo di guide, metodi e tecniche che consentano ai progettisti di scegliere gli strumenti più appropriati nella predizione di vita utile.

Più precisamente i compiti della suddetta commissione possono tradursi in:

- Sviluppo di metodi prestazionali per la progettazione della vita utile basati su modelli di degrado ed azioni ambientali;
- Sviluppo di modelli scientifici semplificati per la progettazione ingegneristica;
- Sviluppo di un tipo di approccio progettuale semplificato e più pratico.

1997

Un altro contributo nel campo della predizione di vita utile viene fornito in un articolo di Bourke e Davies [1997], nel quale gli autori presentano una lista delle caratteristiche essenziali di un sistema di predizione di vita utile. Secondo loro

"l'importanza relativa di ognuno dei punti successivi è discutibile, ma caratteristiche importanti dovrebbero essere considerate le seguenti:

- *Facili da studiare;*
- *Facili da utilizzare;*
- *Rapidi da utilizzare;*
- *Accurati;*
- *Facili da aggiornare;*
- *Facili da comunicare;*
- *Adattabili;*
- *Supportati da dati;*
- *Legati a metodi e strumenti di progettazione già esistenti;*
- *Liberi da burocrazia eccessiva;*
- *In grado di riconoscere l'importanza dell'innovazione;*
- *Relativi a diversi contesti ambientali;*
- *Graditi ai professionisti e ai clienti;*
- *Riflettenti la conoscenza corrente;*
- *Sofisticati al punto tale da consentire pianificazioni sia dettagliate che di massima.*

[21] CIB – International Council for Research and Innovation in Building and Construction
[22] SLM – Service Life Methodologies

1999

Agenda 21

Risale al 1999 uno dei risultati più importanti a livello internazionale, in seguito ad una conferenza UN sull'ambiente e lo sviluppo (UNCED – UN Conference on Environment and Development) avvenuta a Rio de Janeiro (Brasile). Questa conferenza sfociò in un'Agenda per lo sviluppo sostenibile globale ("Agenda 21").
Nel sommario del report pubblicato dal CIB si può leggere [CIB 1999]:

"La tendenza verso uno sviluppo sostenibile mette in forte rilievo l'ambiente costruito e l'industria delle costruzioni. Questo settore della società è di così forte importanza, che la maggior parte delle restanti aree industriali della società mondiale semplicemente svaniscono al confronto. Proprio l'edilizia e le infrastrutture necessarie per il trasporto, la comunicazione e l'approvvigionamento di acqua, la sanità, l'energia, le attività commerciali ed industriali per far fronte alle esigenze di una popolazione mondiale sempre più numerosa, danno vita alla più grande delle sfide. L'Agenda "Habitat II" evidenzia il fatto che l'industria delle costruzioni è uno dei contribuenti maggiori per lo sviluppo socio-economico di ogni Paese.
L'industria delle costruzioni e l'ambiente costruito devono pertanto essere considerate come due aree chiave, se vogliamo puntare ad uno sviluppo sostenibile nella nostra società."

EOTA Document [EOTA 1999a]

E' del 1999 un documento pubblicato dall'EOTA che descrive come stimare la "working life" dei prodotti correlandola alla loro durabilità. Tale documento si basa fondamentalmente su considerazioni riprese dalla Raccomandazione RILEM [RILEM 1989] e dalla BS 7543:1992 [BSI 1992].

Le working lives sono mostrate nella **tabella 3.4**. Il documento inoltre sancisce come

"Per l'EOTA (così come per il CEN) la Working Life assunta di un prodotto dovrebbe essere interpretata come un valore base e di riferimento quando sono stabiliti il tipo e la severità dei metodi di verifica (ad esempio il numero di cicli di gelo-disgelo) ed informazioni relative alla durabilità."

Assumed life of works (years)		Working life of construction products to be assumed in ETAGs, ETAs and hENs (years)		
Category	Years	Category		
		Repairable or easily replaceable	Repairable or replaceable with some more efforts	Lifelong [2]
Short	10	10 [1]	10	10
Medium	25	10 [1]	25	25
Normal	50	10 [1]	25	50
Long	100	10 [1]	25	100

1 In exceptional and justified cases, e.g. for certain repair products, a working life of 3 to years may be envisaged (when agreed by EOTA TB or CEN respectively).
2 When not repairable or replaceable "easily" or "with some more efforts".

Tab. 3.4 – Working lives assunte per opere e prodotti da costruzione

Guidance Paper F [EC 1999]

Sempre nel 1999 la Commissione UE ha pubblicato un documento (Guidance Paper F) contenente linee guida per produttori di specificazioni tecniche (membri CEN/CENELEC – EOTA).
Oltre a riprendere i valori di working lives già individuati nel documento EOTA, vengono fornite alcune indicazioni sulla stima della durabilità di prodotti da costruzione.

"5. Stima della durabilità

La durabilità dei prodotti da costruzione può essere stimata usando metodi basati sulle prestazioni, su soluzioni descrittive o su una combinazione dei due.

* * *

Soluzioni descrittive

Queste consistono in descrizioni di un prodotto basate sull'esperienza o su misure ad esso correlate, e che assicurino un'adeguata durabilità per un dato prodotto sotto condizioni definite, come ad esempio:

- *Specificazione di rivestimenti protettivi;*
- *Composizione o spessore del materiale;*
- *Raccomandazioni sulle condizioni di installazione nell'opera;*
- *Specificati requisiti di manutenzione;*
- *Etc…*

* * *

Le soluzioni proposte devono tenere in considerazione il tipo di uso del prodotto ed essere valide per un range ben definito delle condizioni di esposizione incontrate in Europa (ad esempio una soluzione descrittiva che fornisce una durabilità accettabile in Sud Europa potrebbe non essere appropriata per le condizioni riscontrate in Nord Europa).

Test prestazionali

La seconda strada per la stima della durabilità implica test prestazionali condotti su un prodotto al fine di determinare la variazione delle sue caratteristiche sotto una data azione o un ciclo di azioni. I più comuni tipi di test prestazionali sono:

- ***Test diretti*** *– il raggiungimento di un certo livello di prestazione è riconosciuto sufficiente per fornire una durabilità accettabile (ad esempio abrasione, fatica, test di impatto, …);*
- ***Test indiretti*** *– misurazione di caratteristiche "proxy", che possono essere correlate alle prestazioni attuali e quindi alla durabilità (ad esempio porosità per la resistenza ai cicli di gelo-disgelo e durezza per la resistenza all'abrasione);*
- ***Test di invecchiamento naturale*** *– tali test danno un'indicazione diretta della durabilità (ad esempio test di corrosione) oppure consentono di sviluppare comuni*

test prestazionali dopo un trattamento, determinando quindi il degrado delle prestazioni;

- ***Test di invecchiamento accelerato*** *– come sopra, ma con il normale processo di invecchiamento accelerato, al fine di ridurre la durata del test;*
- ***Test "tortura"*** *– il prodotto è soggetto a condizioni che sono molto più severe di quelle mai incontrate in esercizio."*

2000

ISO 15686-1:2000

La commissione tecnica più rilevante per la vita utile dell'ambiente costruito è la ISO/TC59 "Building Construction", all'interno della quale viene presto istituita una sottocommissione (SC14 "Design Life") con lo scopo ben preciso di occuparsi esclusivamente di vita utile.
Tutti i precedenti sforzi sono stati recepiti dal gruppo ISO/TC59/SC14, che nel 2000 ha pubblicato la prima parte delle norme ISO della serie 15686 (ISO 15686-1:2000), che tratta problemi legati alla pianificazione della vita utile.
La norma[23], oltre a trattare aspetti generali legati alla programmazione della vita utile di edifici e componenti edilizi, riprende le indicazioni già contenute nella BS 7543:1992, nella CS 478-95, nella Guidance Paper F e nei documenti EOTA.
Pur cambiando leggermente i valori di vita utile, la filosofia di fondo resta sempre la stessa, dando origine alla seguente tabella (**tab. 3.5**).

Design life of building	Components			Building services
	Inaccessible or structural	Replacement is expensive or difficult*	Major replaceable	
Unlimited	Unlimited	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10
NOTE 1: Easy to replace components may have design lives of 3 or 6 years NOTE 2: An unlimited design life should very rarely be used, as it significantly reduces design options. * including below ground drainage				

Tab. 3.5 – Vite utili minime suggerite per componenti edilizi

2001

ISO 15686-2:2001

Un anno più tardi viene pubblicata la seconda parte dello standard[24], che tratta nello specifico metodi per la determinazione della vita utile in condizioni di riferimento.

[23] ISO 15686-1:2000 *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles*
[24] ISO 15686-2:2001 *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 2: Service life prediction procedures*

La norma, che anche in questo caso recepisce molte delle indicazioni sviluppate in lavori precedenti (BS 7543:1992, documenti EOTA, Guidance Paper F), si configura presto come fondamentale punto di riferimento per l'identificazione delle informazioni necessarie per una corretta valutazione della durata di componenti edilizi, per la selezione e lo sviluppo delle prove, per l'interpretazione dei dati e per la conseguente analisi dei risultati ottenuti.

3.2 Il contributo italiano in ambito UNI

A livello nazionale, il DBCG si è recentemente attivato anche in ambito normativo, prendendo parte al Gruppo di Lavoro UNI GL 15.
Il tavolo di lavoro sulla "Valutazione della durabilità dei componenti edilizi" (facente capo alla commissione UNI "Processo Edilizio") ha consentito di riunire esponenti sia del mondo accademico che di quello professionale, recependo così contributi e proposte anche da parte di produttori e di associazioni di categoria.
La norma che ne è scaturita, di prossima pubblicazione, è suddivisa in tre parti:

- **Parte 1°:** "La durabilità dei componenti edilizi – Terminologia e definizione dei parametri di valutazione";
- **Parte 2°:** "La durabilità dei componenti edilizi – Metodo per la valutazione della propensione all'affidabilità";
- **Parte 3°:** "La durabilità dei componenti edilizi – Metodo per la valutazione della durata (vita utile)".

La prima parte della norma ha lo scopo di unificare le definizioni dei termini e dei parametri per la valutazione della durabilità dei componenti edilizi.
La seconda parte recepisce una metodologia per la valutazione dell'affidabilità di componenti edilizi in termini di "propensione all'affidabilità" sviluppata proprio dal DBCG all'interno del Dipartimento BEST (ex – DISET). Di tale metodo, che consente di compiere valutazioni "a tavolino" in fase decisionale sull'affidabilità di un oggetto edilizio, verranno illustrate le caratteristiche principali nel successivo capitolo 4. L'affidabilità viene dunque intesa all'interno della norma (e alla luce del metodo stesso) come la "*probabilità dell'oggetto edilizio (elemento tecnico, subsistema tecnologico) di mantenere sensibilmente invariata nel tempo la propria qualità secondo definite condizioni d'uso*".
L'ultima parte, infine, oltre a far propria la metodologia ISO per la previsione di vita utile di un componente edilizio, nonché il Metodo Fattoriale per la valutazione della vita utile stimata in condizioni di progetto, presenta in allegato metodi previsionali alternativi, tra i quali il Metodo dei Limiti Prestazionali (PLM), anch'esso sviluppato e portato avanti dal nostro gruppo di lavoro all'interno del Dipartimento. La descrizione di tale metodo sarà parte integrante del capitolo 9.

Cap. 4 – La durabilità e l'esigenza di un approccio integrato

La strada per la pianificazione della vita utile è dunque tracciata.
Le prime due parti della serie ISO 15686 ci danno tutti gli strumenti necessari per inquadrare il problema e tentare di risolverlo, attraverso un approccio integrato di tipo metodologico-sperimentale.
La normativa internazionale di riferimento sviluppata in ambito ISO TC59/SC14 "Design Life" (ISO 15686-1 e ISO 15686-2) introduce infatti una metodologia generale di valutazione della durabilità divisa nelle due fasi riportate di seguito:

- Valutazione della vita utile in condizioni di riferimento – Reference Service Life
- Valutazione della vita utile in condizioni di progetto – Estimated Service Life

Per il primo passaggio viene fornita una metodologia per la valutazione della vita utile di un elemento tecnico in determinate condizioni (di riferimento, appunto), mentre il secondo passaggio avviene grazie ad uno strumento progettuale da utilizzare a tavolino (il Metodo Fattoriale), che consente di rielaborare risultati ottenuti sperimentalmente per valutare la vita utile dei componenti in condizioni di progetto, al fine di sviluppare una corretta programmazione gestionale dell'intervento ed una corretta valutazione dei costi relativi al ciclo di vita, consentendo dunque un'ottimizzazione delle scelte progettuali dal punto di vista della sostenibilità dell'intervento.
Analizzeremo ora più nel dettaglio questi due differenti aspetti legati alla pianificazione della vita utile di componenti edilizi.

4.1 Valutazione della vita utile in condizioni di riferimento – RSL[25]

La valutazione della durabilità in condizioni di riferimento viene eseguita sostanzialmente attraverso prove di invecchiamento accelerato in laboratorio e di invecchiamento naturale per esposizione in esterno, ovvero attraverso l'analisi di risultati desunti dal comportamento nel tempo di edifici esistenti.
Il diagramma di **figura 4.1** è tratto dalla ISO 15686-2:2001, e si compone dei seguenti punti:

- **Definizione:** definizione delle esigenze degli utenti e dei requisiti tecnologici connotanti l'elemento tecnico, del contesto sollecitante (tipo e intensità degli agenti), delle prestazioni richieste, ecc.;
- **Preparazione:** identificazione dei meccanismi di degrado e degli effetti, scelta dei criteri di misura per le caratteristiche funzionali[26] e delle prestazioni tecnologiche, ricerca bibliografica, ecc.;
- **Prove preliminari:** necessarie per testare le metodologie di prova e le tecniche di misura per le caratteristiche funzionali;

[25] Tratto dalla "Valutazione della durabilità del calcestruzzo armato", progetto di ricerca a cura di Daniotti B., Iacono P., 2003. Si veda anche "La durabilità in edilizia", Daniotti B., CUSL, 2003.
[26] Per caratteristiche funzionali si intendono particolari caratteristiche in grado di influenzare direttamente le prestazioni fornite dall'elemento tecnico.

- **Esposizione e misura:** la fase in cui si svolgono i test d'invecchiamento, sia naturale sia accelerato, ed in cui si misurano gli effetti degli agenti sui componenti edilizi (degradi);
- **Analisi ed interpretazione dei risultati:** è il momento in cui, analizzando i risultati ottenuti con la sperimentazione (in termini di andamento delle prestazioni nel tempo), viene valutata la vita utile di un componente, in determinate condizioni di sollecitazione;
- **Reporting:** rappresenta la fase che consente al lettore di venire a conoscenza dei risultati ottenuti al termine della metodologia. È fondamentale che tali dati siano accompagnati da informazioni circa le ipotesi adottate e le limitazioni di utilizzo cui sono soggetti i risultati stessi.

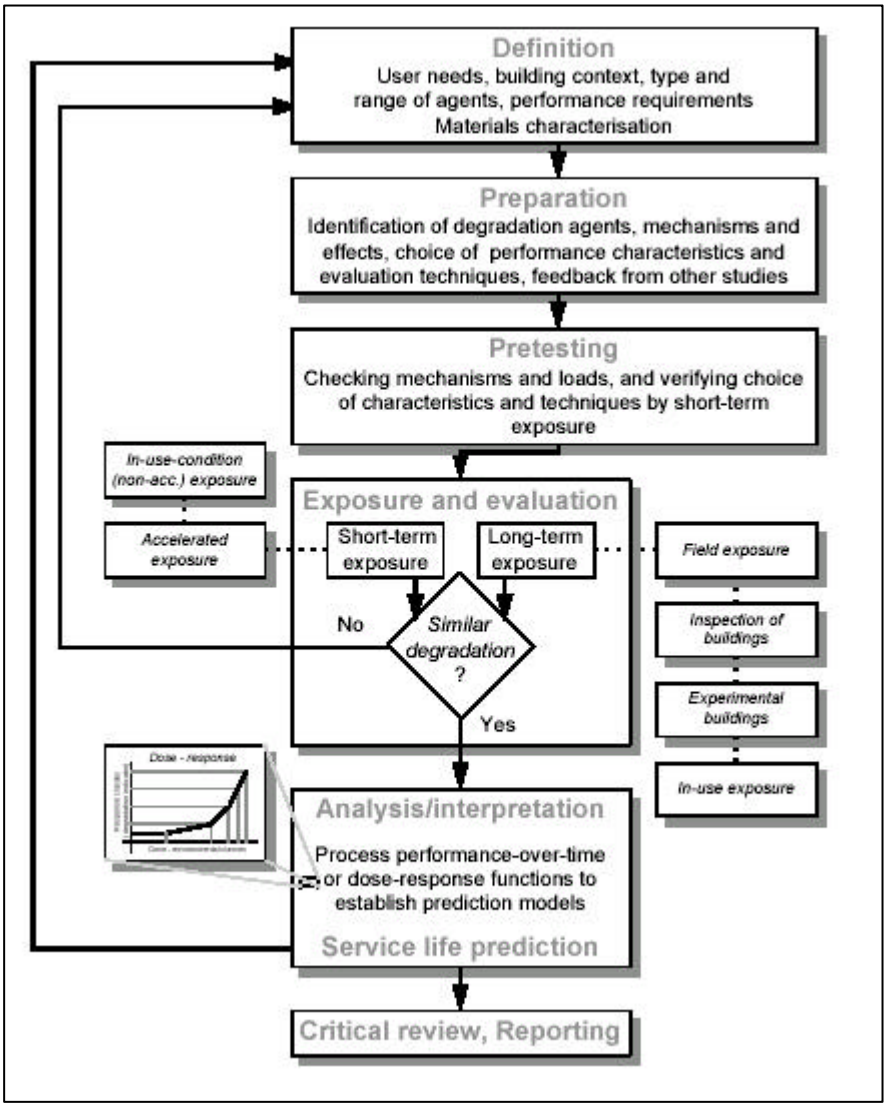

Fig. 4.1 – Metodologia sistematica della predizione di vita utile dei componenti edilizi

4.1.1 Definizione degli obiettivi dello studio per la previsione di vita utile

Inizialmente devono essere definiti gli obiettivi dello studio per la previsione di vita utile e, di conseguenza, il livello di approfondimento dello studio stesso, sulla base del grado di conoscenza già acquisita circa il comportamento nel tempo dell'elemento tecnico.
I casi estremi di livello dello studio sono i seguenti:

- Studio specifico: l'obiettivo di questo studio è di valutare la vita utile dell'elemento tecnico in definite condizioni ambientali e d'uso di riferimento (RSL), con un pacchetto definito di specificazioni prestazionali;
- Studio generale: l'obiettivo di questo studio è di definire un modello di comportamento nel tempo dell'elemento tecnico utile per cercare di valutarne la vita utile in diverse condizioni ambientali di sollecitazione e d'uso, sulla base dell'indicazione di specificazioni prestazionali.

Definizione di uno studio specifico

- Identificazione delle condizioni ambientali e d'uso: deve essere definito un contesto edilizio di riferimento, sulla base delle informazioni disponibili sul caso specifico. Questo contesto deve tenere conto della specifica destinazione d'uso dell'elemento tecnico, della sua conformazione tecnologica, e comprende una descrizione dell'ambiente circostante l'elemento tecnico, considerando il contesto specifico progettuale;
- Definizione del pacchetto dei requisiti connotanti e delle relative specificazioni di prestazione: deve essere identificato il pacchetto di requisiti connotanti per l'elemento tecnico ed i limiti relativi alle prestazioni corrispondenti, in accordo con quanto specificato.

Definizione di uno studio generale

- Identificazione delle alternative di condizioni ambientali e d'uso: devono essere definite tutte le alternative di ambiente e di destinazione d'uso dove il componente può essere utilizzato o definite dallo studio. I vari tipi di ambiente possono essere raggruppati in classi, rappresentative di un certo intervallo di intensità degli agenti. Occorre considerare le diverse modalità d'uso (e posizione) dell'elemento tecnico, perché queste influenzano le condizioni d'uso e gli effetti sinergici degli agenti di degrado;
- Definizione del pacchetto dei requisiti connotanti per la specifica classe di elementi tecnici: deve essere identificato il pacchetto di requisiti connotanti per l'elemento tecnico, in accordo con quanto specificato in precedenza;
- Caratterizzazione dell'elemento tecnico: devono essere definite le caratteristiche funzionali degli elementi funzionali dell'elemento tecnico; a questo fine può essere utilizzato il metodo dell'analisi funzionale che si basa sulla definizione del modello funzionale dell'elemento tecnico con la relativa assegnazione di funzioni analitiche agli elementi funzionali attraverso la valutazione delle caratteristiche funzionali degli elementi stessi.

4.1.2 Preparazione

Dopo che il tipo di studio per la previsione della vita utile è stato definito, in accordo con il punto precedente, devono essere identificati i possibili meccanismi di degrado per l'elemento tecnico, sulla base degli agenti significativi nel contesto/i identificato/i (specifico o generico); per i meccanismi di degrado individuati devono essere ipotizzate le modalità di esposizione in programmi di invecchiamento (accelerato o naturale).

- Identificazione degli agenti di degrado e delle loro intensità: devono essere identificati il tipo e la distribuzione di intensità degli agenti di degrado stimati come significativi in relazione al contesto/i identificato/i (specifico o generico).
  Devono essere considerati uno o più contesti ambientali, secondo il tipo di studio.
  Gli agenti possono essere individuati facendo riferimento alla norma UNI 8290[27].
  Una lista sintetica degli agenti di degrado significativi è presentata in **tabella 4.2**.

CLASSIFICAZIONE AGENTI	AGENTE
Agenti climatici	Pioggia Neve Ghiaccio Grandine Vapore acqueo Vento Particelle Alte e basse temperature Cicli di temperatura Radiazione solare Radiazione termica
Agenti chimici	CO_x, NO_x, SO_x, O_x Acido solforico Acido carbonico Sali
Agenti artificiali esterni	Radiazione elettromagnetica Stress meccanici discontinui
Agenti artificiali dovuti all'uso	Acqua di lavaggio Detergenti Stress meccanici continui
Agenti biologici	Animali (vertebrati, invertebrati, batteri) Vegetali

Tab. 4.2 — Lista degli agenti di degrado significativi per la stima di vita utile degli elementi

- Agenti dovuti all'uso: sebbene gli agenti dovuti all'uso normalmente non siano inclusi nei programmi di invecchiamento accelerato, qualora li si ritenga determinanti per la stima della vita utile, questi possono essere valutati per mezzo di programmi di valutazione della durabilità in edifici in condizioni reali di utilizzo. In ogni caso il cattivo uso e le false manovre sono escluse dallo scopo della presente norma. Normalmente la messa in opera ed eventuale manutenzione dei campioni di prova sottoposti al programma di invecchiamento devono seguire le raccomandazioni fornite dal produttore e la normativa tecnica di riferimento;

[27] UNI 8290-3:1987 *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti*

- Identificazione dei possibili meccanismi di degrado: devono essere identificati tutti i possibili meccanismi di degrado dovuti agli agenti significativi individuati, che possono indurre variazioni significative delle prestazioni tecnologiche dell'elemento tecnico. I meccanismi di degrado devono essere rappresentati in termini di azioni sull'elemento tecnico e relativi effetti di degrado. I meccanismi possono essere identificati sulla base della conoscenza circa la composizione chimica dei materiali costituenti l'elemento tecnico, in termini di reazione chimica (es. idrolisi, foto-ossidazione, ecc.). Una base di informazione circa il comportamento nel tempo dell'elemento tecnico deve essere costituita a partire di risultati di altri studi sviluppati sull'elemento stesso o su elementi tecnici simili. Questa analisi preliminare può consentire una considerevole riduzione del programma di prove sia per quanto riguarda i tipi di invecchiamento sia per quanto riguarda il tempo necessario;
- Identificazione dei possibili decadimenti prestazionali: devono essere identificati i plausibili decadimenti delle prestazioni tecnologiche dell'elemento tecnico e delle caratteristiche funzionali delle parti costituenti l'elemento stesso dovuti ai meccanismi di degrado individuati;
- Scelta delle caratteristiche funzionali critiche e dei relativi metodi di valutazione: le caratteristiche funzionali, corrispondenti al pacchetto di requisiti tecnologici connotanti, devono essere interpretate in relazione alle caratteristiche che possono essere modificate secondo quanto specificato. Per ognuna delle caratteristiche funzionali critiche selezionate devono essere definiti i metodi di misura, al fine di ottenere valori quantitativi circa i decadimenti delle caratteristiche stesse. I valori iniziali delle caratteristiche funzionali selezionate devono essere misurati prima dell'inizio delle prove di invecchiamento, o comunque su campioni di prova non invecchiati;
- Sviluppo del programma preliminare di esposizione: sulla base delle informazioni ottenute nei punti precedenti, devono essere sviluppate specifiche procedure di invecchiamento basate sulla simulazione degli agenti sollecitanti individuati in quanto rilevanti per provocare i meccanismi di degrado. Il programma preliminare di esposizione si rende necessario solo nel caso in cui le procedure di invecchiamento non siano già state sperimentate. Quando si utilizza un programma di invecchiamento accelerato, occorre assicurarsi che i livelli di intensità degli agenti non siano tanto severi da provocare meccanismi di degrado non riscontrabili in condizioni di servizio tipiche dell'edilizia. Le procedure sviluppate in questa fase formano la base per la definizione del programma preliminare di esposizione.

4.1.3 Prove preliminari

- Aspetti generali: le prove preliminari devono essere condotte sulla base del programma preliminare sviluppato al precedente punto relativamente alle caratteristiche funzionali, che devono essere misurate prima e dopo l'esposizione dei campioni agli agenti di degrado cui l'elemento tecnico è soggetto in servizio, o almeno a quelli ritenuti significativi. Le prove preliminari si rendono necessarie solo nel caso in cui le procedure di invecchiamento non siano già state sperimentate. Queste prove devono essere eseguite correttamente al fine di:

    - Stabilire i livelli di intensità degli agenti necessari per provocare variazioni significative delle caratteristiche funzionali e per attivare l'accelerazione desiderata nei tempi di invecchiamento;

  - Contribuire ad una migliore comprensione della natura dei fenomeni di degrado principali, causa dei decadimenti prestazionali, ed individuare altre variazioni di caratteristiche funzionali eventualmente rilevanti;
  - Verificare la fattibilità delle prove selezionate di valutazione e misura delle caratteristiche funzionali;
  - Stabilire gli agenti di degrado principali ed il loro ordine di importanza;
  - Dimostrare la comparsa dei meccanismi di degrado individuati, quale causa di decadimento prestazionale.

- Intensità degli agenti di degrado utilizzati nelle prove preliminari: le intensità degli agenti di degrado utilizzati nelle prove preliminari devono essere limitate in relazione alla distribuzione quantitativa in condizioni di servizio. I dati climatici (estremi) relativi ai climi nei quali l'elemento tecnico potrà essere usato possono fornire la base per la scelta dei livelli di intensità di questi agenti nelle prove preliminari.

4.1.4 Programmi sperimentali di esposizione all'invecchiamento

- Aspetti generali: l'intero programma sperimentale di esposizione all'invecchiamento deve essere definito con l'obiettivo di fornire i dati necessari per gli obiettivi ed il livello di studio, considerando le informazioni e i dati ottenuti dalle procedure descritte ai punti precedenti. Per esposizione all'invecchiamento in questo contesto si intende ogni tipo di procedura nella quale campioni di elemento tecnico sono esposti agli agenti di degrado definiti nella precedente tabella 4.2;
- Sviluppo dei programmi sperimentali di esposizione all'invecchiamento: in generale poiché le caratteristiche funzionali degli elementi tecnici e le condizioni ambientali sono variabili stocastiche, cioè rappresentabili in termini di distribuzione statistica, il programma sperimentale di esposizione all'invecchiamento deve essere progettato, se possibile, considerando una significativa numerosità di campioni di prova, sufficiente per consentire un'elaborazione statistica dei dati di prova. Nel caso in cui questo non sia possibile, per prove troppo onerose (in termini di costo e/o tempo) oppure per i programmi di valutazione su edifici sperimentali, gli intervalli statistici dei valori dovrebbero, se possibile, essere valutati attraverso altri metodi o altre fonti di informazione. Per tutti i programmi sperimentali di esposizione all'invecchiamento, le condizioni di prova devono essere registrate in continuo, oppure ad intervalli temporali sufficientemente brevi, per le seguenti ragioni:

  - Consentire la valutazione di andamenti nel tempo di prestazioni e caratteristiche rappresentabili come equazioni P(t), C(t);
  - Permettere la correlazione tra diversi periodi e siti di esposizione, in particolare nel caso di programmi di esposizione in esterno in condizioni ambientali non controllate;
  - Verificare che le condizioni ambientali reali siano rappresentative delle condizioni di riferimento, in particolare nel caso di programmi di esposizione in esterno in condizioni ambientali non controllate;
  - Verificare che siano raggiunte le intensità degli agenti di degrado previste, in particolare nel caso di programmi di esposizione in laboratorio con condizioni ambientali controllate.

Nel caso di programmi di esposizione in laboratorio con condizioni ambientali controllate i dati ambientali devono essere misurati dettagliatamente in prossimità dei campioni di prova.
Nel caso di programmi di esposizione in esterno con condizioni ambientali non controllate i dati ambientali possono essere misurati in prossimità dei campioni di prova oppure possono essere acquisiti da stazioni di rilevamento nelle vicinanze del sito di esposizione.

Programmi di esposizione in esterno a lungo termine

- Livello e tipo: il programma di esposizione in esterno può consistere in una esposizione su edifici sperimentali o in condizioni d'uso, da cui possano essere dedotte informazioni sul decadimento delle prestazioni nel tempo dell'elemento tecnico, oppure può consistere nella semplice esposizione in esterno di campioni di prova dell'elemento tecnico. Il programma di esposizione deve essere progettato in modo che siano considerati tutti gli agenti significativi: anche nel caso dello studio specifico l'esposizione dovrebbe preferibilmente essere eseguita in diversi ambienti sollecitanti. Le diverse modalità in cui i programmi di esposizione in esterno a lungo termine sono sviluppati sono descritte nelle seguenti quattro categorie:

    - Esposizione in esterno di campioni di prova;
    - Ispezioni su edifici;
    - Esposizione in edifici sperimentali;
    - Esposizione in condizioni d'uso.

- Esposizione in esterno di campioni di prova: per le modalità di esposizione in esterno è possibile fare riferimento alle norme internazionali disponibili, attualmente utilizzate nei programmi di valutazione di durabilità per i prodotti: ISO 2810, ISO 8565, ISO 4607, ISO 877, ISO 4665-2, ISO 9226.
  E' essenziale notare che:

    - Le esposizioni di campioni di elemento tecnico all'esterno possono essere considerate come invecchiamenti accelerati, ad esempio con i campioni esposti a Sud, inclinati a 45°: occorre quindi operare delle valutazioni circa il grado di accelerazione dell'esposizione e quindi il fattore di rescaling temporale;
    - I risultati dell'esposizione di campioni di elemento tecnico all'esterno sono relativi allo specifico sito di esposizione e l'elaborazione dei risultati relativamente ad altre località richiede la definizione di modelli di previsione dell'andamento delle prestazioni nel tempo e dei dati climatici delle specifiche località;
    - Si ponga attenzione nel trarre conclusioni da un periodo di esposizione ad un altro, specialmente se il tempo d'esposizione è breve.

- Ispezioni su edifici: la vita utile degli elementi tecnici può essere valutata attraverso l'ispezione di edifici. Il numero considerato di edifici analoghi, da un punto di vista tecnologico, ambientale e di destinazione uso deve essere sufficiente per consentire l'applicazione di metodi statistici di campionatura;

- Esposizione in edifici sperimentali: la vita utile degli elementi tecnici può essere valutata attraverso l'esposizione dell'elemento tecnico in edifici sperimentali. Valgono le stesse considerazioni valide per l'esposizione in esterno di campioni di prova;
- Esposizione in condizioni d'uso: l'esposizione in condizioni d'uso è rappresentato dall'inserimento intenzionale dell'elemento tecnico in un edificio reale, in condizioni normali d'uso, al fine di valutare la vita utile del componente.

Esposizioni a breve termine

- Esposizioni accelerate: nei programmi di esposizione accelerata i campioni di elemento tecnico devono essere sottoposti in laboratorio a cicli di invecchiamento rappresentanti l'inviluppo degli agenti di degrado ritenuti significativi. Le caratteristiche funzionali delle parti costituenti l'elemento tecnico devono essere misurate prima, durante e dopo l'invecchiamento. Eventuali effetti sinergici possono essere considerati nella definizione del ciclo di invecchiamento. Deve essere verificato che i meccanismi di degrado ottenuti in laboratorio siano gli stessi ottenuti nelle esposizioni in esterno;
- Esposizione a breve termine in condizioni d'uso: esposizione a breve termine in condizioni d'uso con caratteristiche simili alle esposizioni a tempi lunghi possono essere utilizzati quando gli effetti di degrado possono essere identificati in tempi brevi, tramite strumenti di analisi superficiale ad elevata sensibilità.

Valutazioni prestazionali

- Schema di valutazione: durante l'esposizione all'invecchiamento, le prestazioni e le caratteristiche funzionali devono essere misurate secondo le tecniche definite e secondo intervalli temporali definiti sulla base degli obiettivi dello studio. Analisi non distruttive o semplicemente visive devono essere eseguite con intervalli ravvicinati al fine di identificare velocemente la comparsa dei meccanismi di degrado previsti. L'esposizione deve proseguire sino al raggiungimento dei limiti prestazionali stimati corrispondenti alla fine della vita utile dell'elemento tecnico;
- Comparazione dei tipi di degrado: devono essere confrontati i degradi (come tipo ed intensità) ottenuti nelle prove di invecchiamento accelerato in laboratorio e quelli ottenuti nelle esposizioni naturali in esterno. Se il tipo di degrado ottenuto risulta diverso da quello ottenuto in esterno, i cicli relativi ai programmi di invecchiamento accelerato devono essere modificati dopo aver rianalizzato quanto previsto in precedenza.

4.1.5 Analisi ed interpretazione dei risultati

Sulla base dei risultati circa il decadimento delle caratteristiche funzionali e delle prestazioni ottenute nei vari programmi di esposizione all'invecchiamento (accelerato in laboratorio e naturale in esterno) devono essere sviluppati metodi di calcolo relativi al comportamento nel tempo dell'elemento tecnico nei termini di previsione di vita utile o di distribuzione statistica (valore medio e varianza) di vita utile con la seguente procedura:

- Dai risultati misurati circa l'andamento nel tempo delle caratteristiche funzionali e delle prestazioni durante le prove, vengono definite le funzioni di decadimento nel tempo delle prestazioni P(t) per le specifiche condizioni di prova;

- La previsione di vita utile o la distribuzione statistica (valore medio e varianza) relativa alla vita utile viene calcolata dalle funzioni di decadimento nel tempo delle prestazioni P(t) introducendo i limiti prestazionali per l'elemento tecnico specifici per le condizioni di valutazione;
- Se le condizioni di esposizione utilizzate non corrispondono alle condizioni reali in cui l'elemento tecnico può essere utilizzato, devono essere formulate funzioni di decadimento nel tempo delle prestazioni P(t) per le nuove condizioni, attraverso procedure di interpolazione rispetto alle funzioni disponibili, ovvero adottando i metodi di valutazione della vita utile in condizioni di progetto già presentati.

4.1.6 Reporting

I risultati dello studio dovrebbero essere riportati in modo chiaro ed accurato.
Le scoperte di tutte le analisi, i dati, i metodi, le ipotesi e le limitazioni dovrebbero essere trasparenti e presentati ad un livello di dettaglio sufficiente da permettere al lettore di stimare la qualità dell'informazione. Tutti i risultati, se rilevanti, dovrebbero essere riportati attraverso incertezze statistiche misurate, calcolate o stimate. Le incertezze potrebbero, per esempio, essere espresse in termini di distribuzioni, deviazioni standard o livelli di confidenza. Le esposizioni dovute all'invecchiamento accelerato tipicamente implicano un alto grado di incertezza e i risultati andrebbero per questo considerati con attenzione.

4.2 Valutazione della vita utile in condizioni di progetto – ESL

Parallelamente agli sforzi tesi ad individuare una metodologia sperimentale che fornisse nel tempo dati per una corretta valutazione della durabilità in condizioni di riferimento, come già detto, la necessità di stimare la vita utile di componenti edilizi nella pratica quotidiana e nei progetti di tutti i giorni è sfociata nello sviluppo di un metodo di stima che trova posto all'interno dello standard ISO 15686 e che, ad oggi, è l'unico normato in ambito internazionale.
Nello standard, il Metodo Fattoriale viene presentato nel seguente modo:

" 9. Il Metodo Fattoriale per la stima della vita utile
9.1 Profilo del Metodo Fattoriale

Il metodo consente una stima della vita utile di un componente o di un insieme di componenti in condizioni specifiche. È basato sulla vita utile di riferimento (normalmente la vita utile attesa in ben definite condizioni d'uso che si applicano a quel determinato tipo di componente o di insieme di componenti) e su una serie di fattori modificanti che consentono il passaggio alle condizioni del progetto specifico.

* * *

Il metodo usa fattori modificanti per ognuna delle seguenti voci:

- *Fattore A: qualità del componente;*
- *Fattore B: livello del progetto;*
- *Fattore C: livello di esecuzione dell'opera;*
- *Fattore D: ambiente interno;*
- *Fattore E: ambiente esterno;*

- *Fattore F: condizioni in uso;*
- *Fattore G: livello di manutenzione.*

Ognuna (od ogni combinazione) di queste variabili può influire sulla vita utile. Il Metodo Fattoriale può quindi essere espresso dalla seguente formula:

*ESLC = RSLC * A * B * C * D * E * F * G."*

All'interno della norma, trova posto anche un paragrafo che descrive il Metodo Fattoriale. In tale capitolo, vengono meglio sviluppati i concetti legati ai diversi parametri di input del metodo, e vengono svolte alcune considerazioni sull'utilizzo del metodo stesso.

" 9.2 Uso del Metodo Fattoriale

Il Metodo Fattoriale è un modo di riunire considerazioni su ognuna delle variabili che è probabile condizionino la vita utile. Può essere utilizzato per fare una sistematica stima solo quando le condizioni di riferimento non coincidono pienamente con le predefinite condizioni di uso. Il suo uso può far convergere l'esperienza dei progettisti, le osservazioni, le intenzioni dei committenti e le assicurazioni dei produttori, così come i dati provenienti dai laboratori di prova."

Una serie di altre considerazioni viene svolta sulla vita utile di riferimento; viene fatto notare come il modo più affidabile di definire tale parametro sia l'utilizzo della procedura di predizione di vita utile descritto precedentemente, e che trova spazio nel capitolo 8 della ISO 15686-1 o, più ampiamente, nella ISO 15686-2.

"Il Metodo Fattoriale non fornisce un'assicurazione di vita utile: dà semplicemente una stima empirica basata sulle informazioni disponibili. È differente dalla predizione di vita utile pienamente sviluppata (come descritto nel paragrafo 8). La distinzione tra vita utile stimata e predetta andrebbe fatta quando è data una previsione di vita utile. Le informazioni prese in considerazione dovrebbero inoltre essere registrate, in modo che sia chiaro se la stima sia particolarmente robusta o meno.

* * *

Il Metodo Fattoriale può essere applicato sia a componenti che ad insiemi di componenti. Quando è applicato ad insiemi di componenti, è necessario considerare le interfacce (per esempio i giunti) tra i componenti, così come i componenti stessi."

4.3 L'affidabilità: un'illustre sconosciuta

Nei paragrafi precedenti, abbiamo descritto la metodologia generale di valutazione della durabilità impostata in ambito internazionale e normata a livello ISO dalle prime due parti della serie 15686.
Un dubbio a questo punto coglierà l'attento lettore: i parametri in grado di governare il requisito di durabilità, infatti, non si limitavano allo studio della durata (seppur in tutte le sue

più variegate accezioni[28], ma includevano anche grandezze come l'affidabilità e il tasso di guasto, derivanti da un'analisi affidabilistica che può brevemente riassumersi nei seguenti passaggi:

1) Osservazioni sperimentali su un campione di elementi rappresentativo del fenomeno relativo all'intera popolazione coinvolta;
2) Adozione di un modello probabilistico adeguato alla rappresentazione statistico-inferenziale dei dati, sulla base dei valori statistici e della loro elaborazione in senso probabilistico;
3) Calcolo delle probabilità di altri eventi collegati al fenomeno esaminato, sulla base del modello probabilistico verificato sui dati sperimentali;
4) Formulazione di predizioni *a priori* sul comportamento di elementi analoghi.

La prima fase costituisce il tipico campo di applicazione della *statistica descrittiva*, che si può definire come "l'insieme dei metodi che concernono la definizione, la raccolta, il compendio e la presentazione di un insieme di dati per descriverne in modo adeguato le varie caratteristiche" [Molteni 1988]. La statistica descrittiva ha quindi anche il compito specifico di fornire elaborazioni relative allo "stato" della popolazione esaminata.
Alla seconda fase fornisce il proprio contributo la *statistica inferenziale*, che si può definire come "l'insieme dei metodi che permettono di estendere le informazioni contenute in un campione all'intera popolazione" [Molteni 1988].
La terza fase rientra nella sfera delle teorie probabilistiche e, più precisamente, del *calcolo delle probabilità*, cioè della valutazione attribuibile al possibile verificarsi di un evento.
La quarta fase, infine, costituisce l'output del processo, cioè il conseguimento dell'obiettivo della ricerca sperimentale.

Va messo in luce, quindi, come l'approccio affidabilistico presentato nel capitolo 2 si basi su due differenti aspetti, concettualmente molto diversi l'uno dall'altro; il primo riguarda la statistica, intesa come "processo di acquisizione dei fatti", mentre secondo riguarda la probabilità, intesa come "processo di previsione degli eventi basato su tali fatti".
In altre parole, la capacità di descrivere il comportamento di un'intera popolazione di elementi (in forma *ex-ante* rispetto al loro verificarsi) è subordinata alla possibilità di osservare una serie di fenomeni (questa volta in forma *ex-post*) che si sono già verificati su un campione rappresentativo di una popolazione molto più ampia.
Le considerazioni precedenti servono a mettere in luce il fatto che l'analisi affidabilistica rappresenti un processo dispendioso e non sempre percorribile, fondamentalmente per due motivi principali:

- Da un lato la fase di sperimentazione e collaudo a seguito della produzione di componenti o elementi tecnici avviene difficilmente e, ancor più difficilmente, avviene a livello di produzione dell'organismo edilizio, che invece viene realizzato direttamente in esercizio. In tal senso, saltata la fase di sperimentazione e collaudo, ogni edificio risulta essere, di fatto, un prototipo unico ed irripetibile. A tale unicità contribuisce anche la specificità di ogni contesto fisico e climatico (in una parola, "ambientale") in cui esso è inserito.

[28] Si pensi infatti ai differenti significati di *Design Life*, *Predicted Service Life*, *Reference Service Life*, *Estimated Service Life* introdotte dalla ISO 15686-1:2000

- Dall'altro lato la difficoltà di applicazione degli studi affidabilistici in edilizia è riconducibile alla lunghezza del processo di esecuzione e, ancor più, alla lunghezza stessa del ciclo di vita degli edifici e delle loro parti. La caduta prestazionale nel tempo di elementi tecnici e componenti edilizi risulta essere relativamente bassa, comportando un'estrema difficoltà nell'acquisizione di dati sulla dinamica della qualità nel tempo, da elaborare e da utilizzare per programmare e migliorare l'affidabilità dei prodotti.

Tutto questo rischia di rendere inefficace quanto esposto finora, dal momento che all'atto pratico il progettista difficilmente si troverà nelle condizioni di fruire di un bagaglio statistico così ampio da sviluppare un'analisi affidabilistica di tipo statistico-probabilistico che lo porti ad una plausibile programmazione delle attività di manutenzione.

4.4 Un metodo per la valutazione della propensione all'affidabilità dei componenti edilizi

Il metodo per la valutazione qualitativa della propensione all'affidabilità dei componenti edilizi illustrato nel seguito è stato sviluppato all'interno del Dipartimento ex DISET[29] (ora BEST), e consente di essere applicato "a tavolino"; questo significa che non necessita di indagini difficili e complesse come sono quelle di un metodo rigorosamente sperimentale.
Il metodo qui presentato consente una valutazione previsionale di tipo qualitativo del secondo parametro del comportamento nel tempo di prodotti complessi per l'edilizia, cioè l'affidabilità, operata sul progetto stesso dei componenti, fuori sistema e in condizioni contestuali convenzionali di esercizio, necessario riferimento per conferire all'informazione che ne consegue un utilizzo per le scelte ottimizzanti le specifiche esigenze contestuali di un intervento edilizio sul territorio.
La stima dell'affidabilità al tempo di durata è suscettibile di essere perseguita in termini di propensione attraverso un'analisi del funzionamento sotteso dall'elemento tecnico, cioè attraverso un'analisi funzionale, oggettuale e strutturale dell'elemento stesso.
La valutazione dell'affidabilità così impostata assume il significato di una valutazione qualitativa della *probabilità di non accadimento di guasto* del componente edilizio nell'arco di tempo che va dal cosiddetto tempo zero al tempo di durata o tempo di vita utile spontanea del componente stesso in esercizio. Per tale metodo si addiviene ad una stima della affidabilità espressa tramite valori numerici adimensionali, in scala 0-1 o tramite valori percentuali in scala 0-100%. In relazione all'intervallo di valori assunti, il complemento a 1 (o a 100) del valore stimato di propensione all'affidabilità rappresenta il rischio di entrata in crisi dell'elemento durante la vita utile. Il che significa che bassi valori stimati di propensione all'affidabilità implicano elevato rischio che il componente si guasti prima di raggiungere il tempo di durata.
Il progetto di una soluzione tecnica è valutato secondo quattro chiavi di lettura.
La prima chiave di lettura attiene al grado di equilibrio nella distribuzione delle funzioni insito nella soluzione metaprogettuale ed è volta ad evidenziare il grado di equilibrio nella distribuzione delle funzioni, attraverso l'esame del modello funzionale che presiede il progetto dell'elemento tecnico. Detto grado di equilibrio é indice di intensità di affaticamento cui l'elemento si troverà ad essere soggetto nella sua fase di esercizio: si tratta dell'indice di **affidabilità funzionale** dell'elemento.

[29] Vedi M.G. Rejna. "Valutazione della qualità utile e di prodotti complessi per l'edilizia." Quaderno n.4 del DISET, Politecnico di Milano, Ed. Esculapio, Bologna, 1995

La seconda chiave di lettura attiene all'analisi oggettuale dell'elemento volta a mettere in luce il grado di prevedibile rispondenza dell'esecuzione dell'elemento alle intenzionalità di progetto. Detto grado di rispondenza esecutiva é insito nella soluzione progettuale ed é indice dell'imprecisione prevedibile nell'esecuzione, portatrice di rischi di cadute prestazionali nella fase di esercizio: si tratta dell'indice di **affidabilità esecutiva** dell'elemento.
La terza chiave di lettura attiene all'analisi del progetto; è tesa a far emergere le potenziali variazioni dimensionali che si potranno manifestare nell'esercizio dell'elemento a fronte del contesto sollecitante (variabilità inerente), in generale interessanti in misura diversa gli elementi funzionali costituenti l'elemento tecnico; la conseguente non uniforme ginnastica dimensionale tra i diversi elementi funzionali dell'elemento tecnico potrebbe comportare rischi di precoce perdita di integrità funzionale dell'elemento stesso: si tratta dell'indice di **affidabilità inerente** dell'elemento.
La quarta chiave di lettura attiene all'analisi del progetto finalizzata ad individuare le eventuali incompatibilità chimico-fisiche che possono caratterizzare i diversi materiali costituenti l'elemento tecnico che si interfacciano tra loro. La presenza di incompatibilità di questo genere comporta rischi particolarmente critici per la conservazione nel tempo della struttura dell'elemento tecnico: si tratta dell'indice di **affidabilità critica**.

4.4.1 La valutazione della propensione all'affidabilità globale

Il metodo si basa sull'analisi del modello di funzionamento dei componenti edilizi di una data classe, modello sotteso alla soluzione progettata e individuato tramite l'applicazione dello strumento dell'analisi funzionale, sviluppata anch'essa all'interno di questo Dipartimento.
Il modello di funzionamento presiede una soluzione tecnica sia a livello metaprogettuale, cioè del modello funzionale, costituito dal programma delle funzioni attribuite, sia a livello progettuale, cioè del modello oggettuale, costituito da enti correlati tra loro e portatori di definite caratteristiche funzionali con definiti valori di intensità. Il modello di funzionamento di una data soluzione tecnica schematizza, mediante il modello funzionale, la struttura funzionale della soluzione, cioè i vari luoghi funzionali ai quali sono attribuite le funzioni analitiche che portano allo sviluppo delle funzioni base, sottoinsieme delle funzioni tecnologiche connotanti il subsistema, la loro posizione, le loro reciproche relazioni e, mediante il modello oggettuale, la struttura fisica della soluzione stessa, cioè i vari strati o elementi funzionali componenti, la loro posizione e le loro reciproche relazioni.
Le proprietà-caratteristiche, identificate per tipo e per intensità, possedute al tempo zero dai prodotti che costituiscono gli elementi funzionali di una soluzione tecnica, progettata o già realizzata, sono individuabili attraverso la lettura del modello oggettuale della stessa.
Il metodo per la valutazione della propensione alla affidabilità consiste nell'applicazione al modello funzionale e al modello oggettuale delle soluzioni tecniche, appartenenti a una data classe di elementi tecnici, di specifici criteri di giudizio secondo le quattro chiavi di lettura proposte. I singoli valori quantitativi che emergono da tali applicazioni costituiscono altrettanti indicatori significativi per l'espressione della propensione all'affidabilità.
Questa viene espressa attraverso l'attribuzione di valori adimensionali secondo una scala da 0 a 1, o in termini percentuali da 0 a 100. In detta scala adimensionale di valori numerici, assunta per esprimere il punteggio, 1 (o 100%) indica il massimo grado di propensione all'affidabilità e 0 il grado minimo. Al punteggio 0 e 1 (o 100%) corrispondono il valore minimo e il massimo ideale, con rapporto diretto o indiretto secondo quanto stabilito dai criteri di valutazione.

In realtà i valori limite ideali non vengono raggiunti ma si introducono due valori limite, uno inferiore A_{min} ed uno superiore A_{max}. Entrambi i valori si scosteranno dai valori limite della scala di valutazione di una quantità δ tale che (in scala 0-1):

$$A_{\min} = \delta < A < 1 - \delta = A_{\max}$$

L'applicazione dei singoli criteri di giudizio, appartenenti a una data classe, porta alla formulazione di un indice adimensionale I_i.
L'indicatore globale I_j per la j-esima classe di criteri di giudizio è costituito dalla media di tutti i singoli indici I_i della classe, dove n è il numero dei criteri di giudizio della classe:

$$I_j = \frac{\sum_i^n I_i}{n}$$

Il valore della propensione all'affidabilità elementare è calcolato come funzione di tutti gli indicatori I_j emersi per ogni classe di criteri di giudizio: A_{el} (I_1, I_2, …, I_n).
Il valore della propensione all'affidabilità globale è calcolato come media di tutti i valori di propensione alle affidabilità elementari:

$$A_g = \frac{A_f + A_e + A_i + A_c}{4}$$

I criteri di giudizio che sono qui proposti per la valutazione della propensione all'affidabilità, possono essere utilizzati anche come riferimento nella ricerca e nella diagnosi delle cause di guasto precoce dei componenti edilizi.

Valutazione della propensione all'affidabilità funzionale

La valutazione della propensione all'affidabilità funzionale è operata sul modello funzionale della soluzione tecnica. In generale si osserva che la struttura della distribuzione delle funzioni analitiche nei luoghi funzionali comporta un maggiore o minore rischio di perdita prestazionali, in relazione all'affaticamento al quale gli elementi funzionali sono sottoposti. Le classi di giudizio per la valutazione della propensione all'affidabilità funzionale sono tre: semplicità del modello, affaticamento funzionale, distribuzione delle funzioni (vedi **tabella 4.3**).

Valutazione della propensione all'affidabilità esecutiva

La valutazione della propensione all'affidabilità esecutiva emerge dall'analisi della complessità esecutiva del componente edilizio e si basa sulla previsione della possibile difformità (tra il progetto e l'opera realizzata) dovuta ad errori di esecuzione a causa della complessità oggettuale del componente. Gli errori che possono verificarsi durante la costruzione sono di due tipi: il primo consiste nel posizionamento del componente al di fuori del suo spazio di coordinazione; il secondo consiste nella messa in opera dei materiali, semilavorati, elementi semplici in maniera non conforme alle indicazioni progettuali.

Il rischio di accadimento di detti errori è tanto maggiore quanto più elevata è la complessità tecnologico-dimensionale del componente. La complessità tecnologico-dimensionale è valutata sul modello oggettuale in base ai criteri di giudizio di complessità merceologica, complessità oggettuale e complessità di relazione (vedi **tabelle 4.4 e 4.5**).

Classe dei criteri di giudizio	Criteri di giudizio	Criteri di calcolo	Indice
Semplicità del modello (A)	Semplicità strutturale	Numero dei luoghi funzionali (P_{A1})	I_{A1}
	Semplicità funzionale	Numero delle funzioni analitiche qualitativamente differenziate (P_{A2})	I_{A2}
	Semplicità ubicazionale	Numero delle funzioni base svolte dai singoli luoghi (P_{A3})	I_{A3}
Affaticamento funzionale (B)	Affaticamento medio	Rapporto tra il numero delle funzioni analitiche e il numero dei luoghi (P_{B1})	I_{B1}
	Affaticamento critico	Massimo numero di funzioni analitiche nello stesso luogo (P_{B2})	I_{B2}
	Variabilità dell'affaticamento	Dispersione del carico delle funzioni analitiche (P_{B3}) $P_{B3} = P_{B1} - \left(\frac{P_{B2} + P_{B\min}}{2} \right)$ $P_{B\min}$ = numero minimo delle funzioni analitiche in un singolo luogo	I_{B3}
	Equilibrio dell'affaticamento	Distribuzione equilibrata delle funzioni (P_{B4})	I_{B4}
Distribuzione equilibrata delle funzioni (C)	Distribuzione in serie	Numero delle funzioni analitiche esaustive di una funzione base, assegnate a due o più luoghi (P_{C1}) $P_{C1} = \sum_{i=1}^{r} n_{s_i}$	I_{C1}
	Distribuzione in parallelo	Numero di ripetizioni delle funzioni analitiche esaustive di una funzione base, assegnate a luoghi diversi (P_{C2}) $P_{C2} = \sum_{i=1}^{r} n_{p_i}$ r = numero delle funzioni base del repertorio	I_{C2}

Tab. 4.3 – Criteri di giudizio e di calcolo della propensione all'affidabilità funzionale

Classe dei criteri di giudizio	Criteri di giudizio	Criteri di calcolo	Indice
Complessità merceologica		Numero pesato delle differenti merceologie (N_M)	I_M
Complessità oggettuale		Numero degli elementi funzionali (N_O)	I_O
Complessità relazionale	Complessità di relazione nella direzione X	Numero pesato delle interfacce nella direzione X (I^X)	I_R
	Complessità di relazione nella direzione Y	Numero pesato delle interfacce nella direzione Y (I^Y)	
	Complessità di relazione nella direzione Z	Numero pesato delle interfacce nella direzione Z (I^Z) $N_R = I^X + I^Y + I^Z$	

Tab. 4.4 – Criteri di giudizio e di calcolo della propensione all'affidabilità esecutiva

CRITERI DI CALCOLO	
Complessità merceologica $N_M = \sum_{i=1}^{M} p_i$	p_i = 0,5 Lavorazione in officina; p_i = 1 Lavorazione in opera; M = Numero delle differenti merceologie.
Complessità di relazione $N_{ij}^{X,Z} = \frac{(F_{ij}^{X,Z} * M_{ij}^{X,Z} * E_{ij}^{X,Z}) f_{ij}^{X,Z}}{MS_j}$ $N_{ij}^{Y} = \frac{(F_{ij}^{Y} * M_{ij}^{Y} * E_{ij}^{Y}) f_{ij}^{Y}}{MS_{k\,max}}$	i = i-esimo tipo di interfaccia nel j-esimo elemento funzionale nella direzione X e Z del componente nel modulo iterativo MS_j dell'elemento funzionale; nella direzione Y della k-esima interfaccia tra elementi funzionali nel modulo iterativo di maggiore superficie MS_{kmax}; k = k-esima interfaccia, nella direzione Y, tra elementi funzionali adiacenti; f_{ij} = frequenza dell'i-esimo tipo di interfaccia, nella direzione X e Z, del j-esimo elemento funzionale, nella superficie del modulo iterativo MS_j; f_{ik} = frequenza dell'i-esimo tipo di interfaccia, nella direzione Y, tra elementi funzionali adiacenti nel modulo iterativo MS_{kmax}; **Adattabilità di forma**: F_i = 0,5 tra materiale e materiale o elemento preformato; F_i = 1 tra elementi preformati; **Natura merceologica**: M_i = 0,5 stessa natura; M_i = 1 natura differente; **Processo esecutivo**: E_i = 0,5 interfaccia realizzata in officina; E_i = 1 interfaccia realizzata in opera;
$I_j^{X,Z} = \sum_{i=1}^{N_j^{X,Z}} N_{ij}^{X,Z}$ $I_j^{Y} = \sum_{k=1}^{N_k^{Y}} N_{ik}^{Y}$ $I^{X,Z} = \sum_{j=1}^{N_E} I_j^{X,Z}; I^{Y} = \sum_{k=1}^{N_K} I_k^{Y}$	N^X_j = Numero totale delle interfacce in direzione X, nella superficie del modulo iterativo MS_j del j-esimo elemento funzionale; N^Z_j = Numero totale delle interfacce in direzione Z, nella superficie del modulo iterativo MS_j del j-esimo elemento funzionale; N^Y_k = Numero totale delle interfacce in direzione Y, nella superficie del modulo iterativo MS_{kmax} della k-esima interfaccia tra elementi funzionali adiacenti; N_E = Numero degli elementi funzionali; N_K = Numero delle interfacce, nella direzione Y, tra gli elementi funzionali del componente.

Tab. 4.5 – Criteri di calcolo della propensione all'affidabilità esecutiva

Valutazione della propensione all'affidabilità inerente

La valutazione della propensione all'affidabilità inerente é condotta sul progetto della soluzione tecnica e si basa sulla previsione dell'attivazione di fenomeni inerenti durante la vita del componente.
Questi fenomeni, nell'intera soluzione tecnica e nei singoli elementi funzionali che la compongono, generano variazioni dimensionali che risultano più o meno impedite dal tipo di vincoli posti dalle connessioni tra detti componenti. L'impedimento alla libera esplicazione delle "ginnastiche dimensionali" innesca sforzi tali che possono determinare anche rotture. Le sollecitazioni provocate dal contesto, che determinano le variazioni dimensionali in esercizio, sono dovute in particolare a variazioni della temperatura e a variazioni dell'umidità.
Per esse si identificano due aspetti dell'affidabilità elementare: l'affidabilità inerente termica e l'affidabilità inerente umida.
La valutazione della propensione all'affidabilità inerente del modello oggettuale della soluzione tecnica é valutato secondo i criteri indicati nelle **tabelle 4.6 e 4.7**.

I parametri per il calcolo sono i seguenti:

- Nelle direzioni longitudinale (X) e verticale (Z), il numero e la dimensione degli elementi componenti, il coefficiente di dilatazione termica e/o umida, il fattore di correzione in funzione del valore del modulo elastico dell'elemento, della media dei moduli elastici, della tipologia di connessione tra gli elementi, del valore del momento di inerzia nella sezione YZ e YX (vedi **tabelle 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11**);
- Nella direzione trasversale (Y), il numero delle interfacce tra gli elementi componenti, il coefficiente di dilatazione termica e/o umida, il fattore di correzione in funzione dei valori dei moduli elastici degli elementi, della tipologia di solidarizzazione tra gli elementi, del valore del momento di inerzia nella sezione XY (vedi **tabelle 4.9, 4.12, 4.13 e 4.14**).

Classe dei criteri di giudizio	Criteri di giudizio	Criteri di calcolo	Indice
Variabilità inerente secondo la direzione X	Variabilità inerente termica secondo la direzione X (P_{TX})	$I_{T,UX} = \frac{\sum_{j=1}^{N} P_{TXi}, P_{UXj}}{N}$ N = Numero degli elementi funzionali della soluzione tecnica;	I_{TX}
	Variabilità inerente umida secondo la direzione X (P_{UX})		I_{UX}
Variabilità inerente secondo la direzione Z	Variabilità inerente termica secondo la direzione Z (P_{TZ})	$I_{T,UZ} = \frac{\sum_{j=1}^{N} P_{TZj}, P_{UZj}}{N}$	I_{TZ}
	Variabilità inerente umida secondo la direzione Z (P_{UZ})		I_{UZ}
Variabilità inerente secondo la direzione Y	Variabilità inerente termica secondo la direzione Y (P_{TY})	$I_{T,UY} = \frac{\sum_{j=1}^{N} P_{TYj}, P_{UYj}}{N}$	I_{TY}
	Variabilità inerente umida secondo la direzione Y (P_{UY})		I_{UY}
Variabilità inerente termica		$I_T = I_{TX} + I_{TZ} + I_{TY}$	I_T
Variabilità inerente umida		$I_U = I_{UX} + I_{UZ} + I_{UY}$	I_U

Tab. 4.6 – Criteri di giudizio e di calcolo della propensione all'affidabilità inerente

CRITERI DI CALCOLO	
Variabilità inerente termica e umida secondo la direzione X $P_{TXi\,,UXj} = \dfrac{\sum_{j=1}^{k} (a_j, b_j) * l_j * p_j}{ML_j}$ $p_j = P_{Gi} * P_{Ei} * P_{Ii}$	k = Numero degli elementi presenti nel modulo iterativo dell'elemento funzionale j-esimo nella direzione X; α_j, β_j = Coefficienti di dilatazione termica ed umida dell'i-esimo elemento presente nel j-esimo elemento funzionale; l_j = Lunghezza del j-esimo elemento in metri; p_j = Fattore di correzione del j-esimo elemento e della media aritmetica dei moduli elastici delle relative connessioni funzionali, del valore del momento di inerzia della sezione YZ ($yz^3/12$) e della tipologia della connessione; ML_j = Valore in metri del modulo iterativo lineare secondo X.
Variabilità inerente termica e umida secondo la direzione Z $P_{TZi\,,UZj} = \dfrac{\sum_{j=1}^{r} (a_j, b_j) * h_j * p_j}{MH_j}$	r = Numero degli elementi presenti nel modulo iterativo dell'elemento funzionale j-esimo nella direzione Z; α_j, β_j = Coefficienti di dilatazione termica ed umida dell'i-esimo elemento presente nel j-esimo elemento funzionale; h_j = Altezza del j-esimo elemento in metri; p_j = Fattore di correzione del j-esimo elemento e della media aritmetica dei moduli elastici delle relative connessioni funzionali, del valore del momento di inerzia della sezione YX ($yx^3/12$) e della tipologia della connessione; MH_j = Valore in metri del modulo iterativo lineare secondo Z.
Variabilità inerente termica e umida secondo la direzione Y $P_{TY\,,UY} = \lvert a_{i1}, b_{i1} - a_{i2}, b_{i2} \rvert * p_i$ $p_i = P_{Si} * P_{EYi} * P_{Ieii}$	e_{i1}, e_{i2} = Elementi a maggior sviluppo superficiale nel piano XZ presenti nei due elementi funzionali nell'interfaccia i-esima della soluzione tecnica; α_{i1}, β_{i1}, α_{i2}, β_{i2}, = Coefficienti di dilatazione termica ed umida degli elementi funzionali e_{i1}, e_{i2}; p_j = Fattore di correzione dell'i-esima interfaccia, funzione dei valori dei moduli elastici di e_{i1}, e_{i2}, del valore del momento di inerzia nella direzione XZ degli elementi e_{i1} ($L_{i1}z^3/12$) e e_{i2} ($L_{i2}z^3/12$) e della tipologia di solidarizzazione della j-esima interfaccia (continua, lineare, per punti, semplice contatto).

Tab. 4.7 – Criteri di calcolo della propensione all'affidabilità inerente

Fattore di correzione P_G riferito ai differenti tipi di connessioni funzionali nel piano XZ	
Tipi di connessioni funzionali	**Fattore di correzione P_G**
Chiusa	1
Lineare	0,8
Per punti	0,4
Aperta	0,2

Tab. 4.8 – Fattore di correzione P_G

Classi dei moduli elastici (E)	
Classe dei moduli elastici	**Intervalli di intensità dei moduli elastici E (kN/mm^2)**
A	$E > 80$ kN/mm^2
B	10 $kN/mm^2 < E$ 80 kN/mm^2
C	E 10 kN/mm^2

Tab. 4.9 – Classificazione dei moduli elastici (E)

Fattore di correzione P_E in funzione della classe di modulo elastico E dell'elemento e del valore della media aritmetica E_g dei due moduli elastici E_{g1} e E_{g2}		
Classe del modulo elastico E dell'elemento	**Valore della media aritmetica E_g dei due moduli elastici E_{g1} e E_{g2}**	**Fattore di correzione P_E**
A	A	1
A	B	0,9
A	C	0,8
B	A	0,7
B	B	0,6
B	C	0,5
C	A	0,4
C	B	0,3
C	C	0,2

Tab. 4.10 – Fattore di correzione P_E

Fattore di correzione P_I riferito alle differenti classi di momento d'inerzia (J) dell'elemento nelle direzioni YX, YZ ed XZ	
Classe del momento di inerzia J (cm^4/m)	**Fattore di correzione P_I**
$10^7 < J$	1
$10^6 < J \quad 10^7$	0,87
$10^5 < J \quad 10^6$	0,73
$10^4 < J \quad 10^5$	0,6
$10^3 < J \quad 10^4$	0,47
$10^2 < J \quad 10^3$	0,33
$J \quad 10^2$	0,2

Tab. 4.11 – Fattore di correzione P_I

Fattore di correzione P_S riferito ai differenti tipi di solidarizzazione in direzione Y	
Tipi di solidarizzazione	**Fattori di correzione P_S**
Chiusa	1
Lineare	0,7
Per punti	0,6
Aperta	0,2

Tab. 4.12 – Fattore di correzione P_S

Fattore di correzione P_{Iei1} e P_{Iei2} riferito alle differenti classi di momento d'inerzia (J) della j-esima interfaccia dell'elemento nella direzione Y	
Classe del momento di inerzia J (cm^4/m)	**Fattore di correzione P_I**
$10^7 < J$	1
$10^6 < J \quad 10^7$	0,87
$10^5 < J \quad 10^6$	0,73
$10^4 < J \quad 10^5$	0,6
$10^3 < J \quad 10^4$	0,47
$10^2 < J \quad 10^3$	0,33
$J \quad 10^2$	0,2

Tab. 4.13 – Fattori di correzione P_{Iei1} e P_{Iei2}

Fattore di correzione P_{EY} riferito alle differenti classi di modulo elastico all'interfaccia tra l'elemento E_1 e l'elemento E_2 nella direzione Y		
Classe del modulo elastico E dell'elemento E_1	**Classe del modulo elastico E dell'elemento E_2**	**Fattore di correzione P_{EY}**
A	A	1
A	B	0,84
A	C	0,68
B	B	0,52
B	C	0,36
C	C	0,2

Tab. 4.14 – Fattore di correzione P_{EY}

Valutazione della propensione all'affidabilità critica

La valutazione della propensione all'affidabilità critica è condotta sul progetto della soluzione tecnica e si basa sulla previsione di possibili guasti che possono verificarsi a causa di incompatibilità chimiche e chimico-fisiche tra gli elementi funzionali della soluzione tecnica. Questi fenomeni generano cambiamenti di differenti intensità nell'integrità strutturale del componente in esercizio, dai più lievi che interessano il solo aspetto del componente ai più gravi che ne compromettono l'integrità strutturale.
La valutazione della propensione all'affidabilità critica si basa sull'analisi del grado e del numero di incompatibilità all'interfaccia tra gli elementi funzionali e tra i prodotti che li compongono. Il progetto della soluzione tecnica è valutato secondo i criteri della criticità fisica e della criticità chimica (vedi **tabella 4.15**).

Classe dei criteri di giudizio	Criteri di calcolo	Indice
Criticità fisica	$If_{ij} = \sum_{i=1}^{n_i} Pf_{ij}$ n_i = Numero delle incompatibilità fisiche nella j-esima interfaccia; P_{ji} = Fattore di correzione dell'incompatibilità fisica nella j-esima interfaccia $P_{fi} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} If_{ij}}{N_i}$ N_i = Numero totale di interfacce tra differenti materiali nella soluzione tecnica;	If
Criticità chimica	$Ich_{ij} = \sum_{i=1}^{n_i} Pch_{ij}$ n_i = Numero delle incompatibilità chimiche nella j-esima interfaccia; P_{ji} = Fattore di correzione dell'incompatibilità chimica nella j-esima interfaccia $Pch_i = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} Ich_{ij}}{N_i}$ N_i = Numero totale di interfacce tra differenti materiali nella soluzione tecnica;	Ich

Tab. 4.15 – Criteri di giudizio e di calcolo della propensione all'affidabilità critica

Attraverso questo metodo quindi si è cercato di sopperire alla carenza di dati disponibili al giorno d'oggi per sviluppare corrette valutazioni statistico-probabilistiche sull'affidabilità di componenti edilizi, fornendo nel contempo uno strumento progettuale complementare a quelli messi a disposizione in ambito ISO nel campo della predizione di vita utile.

Cap. 5 – Il dibattito internazionale e l'apertura verso nuovi metodi

La comparsa ufficiale all'interno della serie ISO del Metodo Fattoriale come strumento di passaggio dalla RSL alla ESL creò non poco fermento.
In realtà, già da qualche anno si era aperto un dibattito a livello internazionale, sulla possibilità di un effettivo utilizzo di metodi basati su fattori nella stima della vita utile di componenti edilizi in condizioni di progetto; tali metodi, infatti, venivano già utilizzati in ambito edilizio in realtà quali quella tedesca e, soprattutto, giapponese. Nella breve versione della Principal Guide pubblicata in Inglese [AIJ 1993] veniva introdotto un metodo per passare dalla Standard Service Life (equivalente alla RSL definita nella ISO) alla ESL, attraverso fattori molto simili a quelli già visti.

Una serrata discussione del Metodo Fattoriale è stata presentata nel 1997 da Bourke & Davies [1997], con lo scopo di dare un contributo ai successivi sviluppi del metodo. Nel sommario generale, gli autori concludono così:

"Il sistema dovrebbe servire inizialmente come uno strumento per permettere confronti ed analisi oggettive, piuttosto che come una predizione certa di vita utile.

Non si può comunque nascondere che l'effetto dell'adozione di tale sistema dovrebbe essere di ottimizzare la selezione di componenti, facendo in modo che interventi manutentivi su larga scala, costosi e distruttivi non si rendano necessari.
Ugualmente, dovrebbero essere evitate specificazioni eccessivamente durevoli per edifici caratterizzati da una vita utile breve.
Andrebbe anche evidenziata la facilità con cui la durabilità potrebbe essere migliorata "sulla carta", raggiungendo le massime prestazioni col minimo costo.
I molti benefici conseguibili da analisi dei costi di gestione potrebbero essere finalmente raggiunti, dal momento che verrebbe risolto il problema critico di quanto a lungo dovrebbero durare i componenti.
Tutto ciò potrebbe inoltre contribuire a ridurre i costi totali di costruzione e migliorare la competitività dell'industria."

Lounis *et al.* [1998], in un loro lavoro sulla possibilità di standardizzazione della predizione di vita utile di membrane impermeabilizzanti, pongono l'attenzione su metodologie quantitative che usino modelli stocastici delle prestazioni delle membrane attraverso l'uso di catene di Markov. In ogni caso, nell'articolo sono presenti anche degli sforzi per stabilire metodi di predizione di vita utile alternativi che potrebbero essere applicati alle membrane stesse.
In riferimento al Metodo Fattoriale essi affermano:

"Nonostante la sua praticabilità, questo approccio presenta molti inconvenienti, tra i quali:

- *Non è basato sulle prestazioni, così come sull'identificazione di requisiti minimi prestazionali;*
- *E' basato su scelte arbitrarie di vite standard e su fattori correttivi;*
- *Sfrutta un approccio deterministico, nonostante l'ampia incertezza e variabilità legate alla vita utile.*

Appare chiaro, quindi, che questo metodo non è ad oggi ancora disponibile, né probabilmente facilmente utilizzabile nell'immediato futuro."

Hovde [1998] ha presentato una valutazione del metodo non attraverso l'applicazione pratica, ma semplicemente attraverso considerazioni e discussioni avvenute all'interno del gruppo CIB W080/RILEM TC175 – SLM. Le sue conclusioni sono che c'è una forte esigenza di ulteriori valutazioni del metodo. Nel breve termine, l'autore si augura un lavoro volto ad aumentare la quantità di dati di input, sia per la quantificazione della vita utile di riferimento, sia per i differenti fattori da utilizzare nell'equazione. A medio e lungo termine, invece, si rivelerà indispensabile una valutazione maggiormente approfondita del metodo, che includa, tra le altre cose, la possibilità di descrizioni quantitative della RSL e dei fattori. Secondo Hovde, inoltre, il metodo dovrebbe essere valutato in accordo con i requisiti generali dei metodi di predizione di vita utile già identificati da Bourke & Davies (cfr. pag. 28, cap. 3).

Teply [1999] descrive possibilità e limitazioni riguardo allo sviluppo del Metodo Fattoriale in un metodo semplice e sufficientemente generale di predizione di vita utile di elementi strutturali. Dopo la presentazione del Metodo Fattoriale, l'autore illustra l'uso del metodo attraverso una stima della vita utile di strutture in calcestruzzo armato. Nelle conclusioni, Teply afferma che nella stima di vita utile bisogna porre particolare attenzione ai seguenti punti:

- Esposizione delle strutture ad effetti combinati di processi aggressivi;
- Combinazioni di materiali e progettazione dei giunti;
- Parti mobili e tolleranze di questi movimenti;
- Strati protettivi;
- Accessibilità per l'ispezione, la riparazione o la sostituzione di alcune parti.

In uno studio di pianificazione di vita utile condotto da Hed su un edificio multifamiliare costruito a Gävle, in Svezia, nel 1999, è stata seguita la procedura definita nella ISO 15686-1. La pianificazione della vita utile è stata integrata nella progettazione dell'edificio e seguita dalla fase progettuale all'inizio della fase di costruzione. I risultati sono stati presentati in tre articoli distinti [Hed 1998, 1999, 2000]; in uno di questi sono presenti una serie di considerazioni sull'applicazione del Metodo Fattoriale, così come introdotto dalla ISO.

"Il problema è che sulla vita utile di materiali e componenti edilizi sono stati condotti ancora pochi test, comprendenti tutti gli effetti richiesti al componente edilizio in opera nell'edificio, ad esempio seguendo la metodologia di predizione di vita utile (ISO 1999).
L'accuratezza della vita utile stimata soffre di questo fatto, quindi bisogna chiedersi se valga davvero la pena di fare o meno delle stime. Se l'obiettivo è quello di trovare un valore preciso, appare evidente che l'obiettivo non è raggiunto, ma se l'obiettivo è quello di migliorare la situazione generale nella pianificazione di vita utile, allora la risposta è sì.
Il Metodo Fattoriale è pensato come uno strumento per migliorare la stima della vita utile. È risultato da questo studio, tuttavia, che tale metodo non la migliora. Questo opinione è giustifica dai seguenti punti:

- *Incertezza legata alla RSL e ai valori dei fattori: la formula fattoriale (1) è costituita, a secondo membro, da valori di riferimento (RSL) e fattori correttivi da A a G. Se il valore di riferimento non può essere accuratamente determinato, non è appropriato correggere tale valore con una serie di fattori incerti;*

- *Incertezza sull'effetto della combinazione dei fattori: il metodo non contempla l'idea che sia necessaria una conoscenza di cause ed effetti per stimare la vita utile. La stima sarà basata su accadimenti incontrollabili, che possono agire indipendentemente l'uno dall'altro."*

Tutte le problematiche evidenziate fin qui, hanno fatto in modo che nel tempo si cercassero delle strade alternative per arrivare ad una più corretta valutazione della vita utile stimata. I risultati si sono tradotti in una serie di strumenti progettuali più o meno complicati che hanno dato origine a due, nuove, grandi famiglie (**fig. 5.1**):

- **Metodi statistici:** consentono una modellazione in termini probabilistici sia del contesto sollecitante (agenti) che dei materiali, modellandone spesso il reale comportamento nel tempo. Questo tipo di approccio, indubbiamente più complesso ed oneroso in termini di necessità di dati sperimentali e di risorse economiche, risulta utile laddove occorra garantire livelli elevati di sicurezza; in effetti, ad oggi sono utilizzati in prevalenza per le parti strutturali e in progetti di notevoli dimensioni;
- **Metodi ingegneristici:** questi metodi si pongono a metà strada tra il Metodo Fattoriale ed i metodi statistici, essendo caratterizzati da un grado di complessità paragonabile a quello comunemente affrontato dal progettista nella pratica quotidiana. Consentono una simulazione sufficientemente semplice del comportamento nel tempo dei componenti edilizi, tentando peraltro di garantire l'attendibilità del risultato sulla base di modelli fisici dell'edificio ovvero di risultati sperimentali.

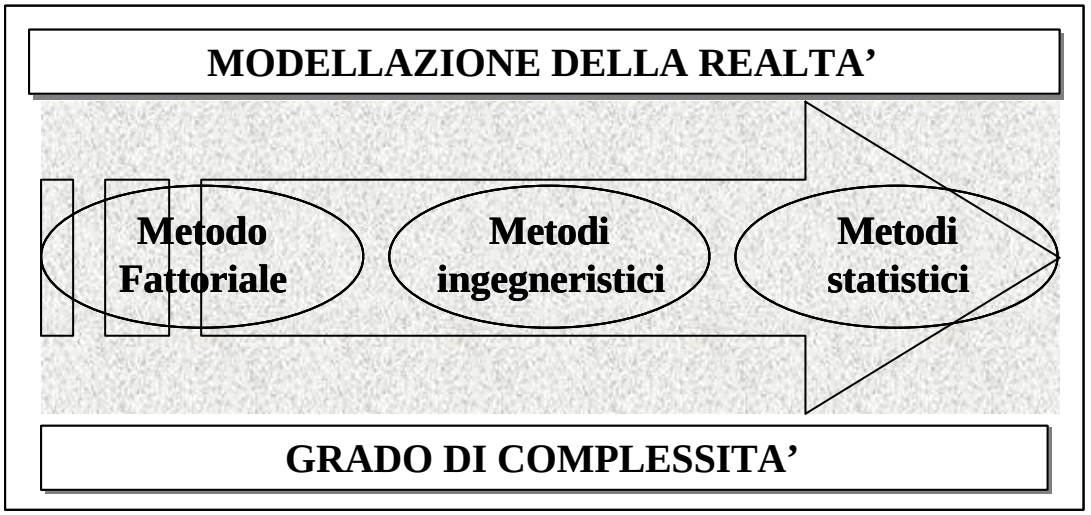

Fig. 5.1 – Relazione tra differenti tipi di metodi di predizione di vita utile

5.1 Metodi probabilistici

Questi metodi sono caratterizzati da input e da modelli di calcolo complessi. Il grado di complessità di questo tipo di approccio rende i metodi probabilistici economicamente applicabili solo in progetti di grande dimensione.
Nei metodi probabilistici, infatti, il degrado è trattato come un fenomeno stocastico; per ogni caratteristica, in ogni periodo di tempo, è definita la probabilità di degrado; di solito viene utilizzato il modello della catena di Markov (vedi **fig. 5.2**), che considera il degrado come un processo stocastico governato da variabili casuali.

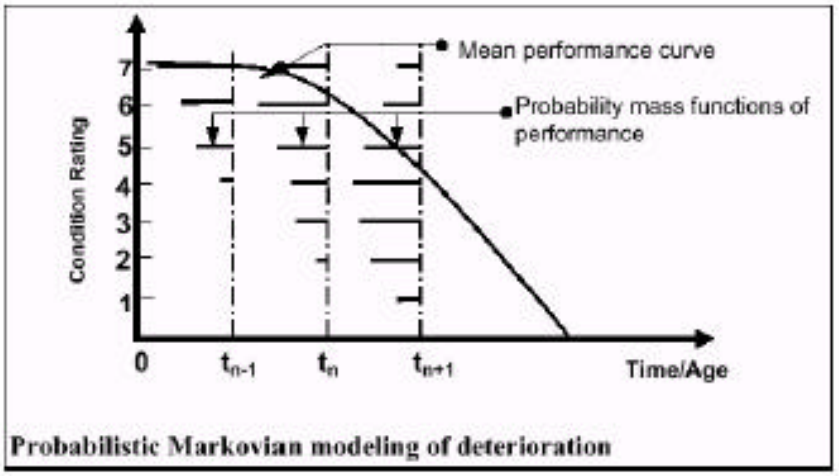

Fig. 5.2 – Modello probabilistico di Markov

L'esempio che segue è tratto da un articolo di Breitenbüchner *et al.* [1999] e riguarda il primo esempio di progettazione della durabilità di strutture in calcestruzzo basato su un approccio prestazionale. Le ipotesi principali riguardarono il copriferro (inteso come fattore determinante per la durabilità della struttura) ed i cloruri (intesi come principale fattore di degrado). Come input vennero inserite tutta una serie di parametri definiti come variabili stocastiche, le cui distribuzione di densità possono essere osservate in **fig. 5.3**.

Variable No	Parameter	Dimension	μ	σ	Distr. Type
1	x_c – Concrete Cover	[mm]	37	2	Expon. Distr.
2	$D_{RCM,0}$ - Cl^--Migration Coef.	[$10^{-12}m^2/s$]	4.75	0.71	Normal Distr.
3	C_{Crit} – Critical Chloride Content	[wt.-%/binder]	0.70	0.10	Normal Distr.
4	n - Age Exponent	[-]	0.60	0.07	Normal Distr.
5	k_t - Factor Test	[-]	0.85	0.20	Normal Distr.
6	k_e - Factor Environment	[-]	1.00	0.10	Normal Distr.
7	k_c - Factor Execution	[-]	1.00	0.10	Normal Distr.
8	C_{SN} - c(Cl^-) - Concrete Surface	[wt.-%/binder]	4.00	0.50	Normal Distr.
9	t_0 – Reference Time	[year]	0.0767	-	Deterministic

Fig. 5.3 – Distribuzioni statistiche usate come input nella progettazione del W.S. Tunnel

Per la definizione degli stati limite venne scelto un indice di affidabilità $1.5 < \beta < 1.8$ per quel che riguarda l'inizio della corrosione, $2.0 < \beta < 3.0$ per l'inizio dello spalling e $3.6 < \beta < 3.8$ per il collasso.
Nell'articolo inoltre si legge:

"A causa degli elevati costi di costruzione e dell'importanza sociale, la richiesta di durabilità di grandi infrastrutture diventa sempre più importante. Requisiti di vita utile pari a 100 o più anni stanno diventando oramai usuali. Per il tunnel in calcestruzzo armato sotto il Western

Scheldt in Olanda, il requisito di vita utile venne identificato in almeno cent'anni. Nessun metodo è stato specificato per provare questa durata. Dal momento che la normativa in campo durabilistico è basata solamente su regole prescrittive[30], senza alcuna specificazione della vita utile, non è stato possibile basare la progettazione su codici esistenti. La progettazione della durabilità è stata svolta sulla base di una metodologia sviluppata in un progetto di ricerca per la Comunità Europea. Questo progetto, soprannominato "DuraCrete"[31], ha migliorato notevolmente l'affidabilità esistente ed i metodi di progettazione strutturale basati sulle prestazioni grazie all'introduzione di modellazioni dei degradi e delle azioni ambientali. Si ritiene che la progettazione probabilistica del Western Scheldt Tunnel sia il primo progetto in cui l'approccio DuraCrete sia stato applicato nella pratica."

5.2 Metodi ingegneristici

Come già detto, i metodi ingegneristici si pongono a metà strada tra il Metodo Fattoriale e i metodi probabilistici.
In particolare, i requisiti principali che dovrebbe possedere un qualsiasi metodo ingegneristico sono i seguenti:

- Il metodo deve essere facilmente comprensibile;
- Il metodo deve essere facile da utilizzare;
- I risultati (per le semplificazioni adottate) devono essere sufficientemente realistici.

Al giorno d'oggi, lo sviluppo di metodi ingegneristici sembra perlopiù orientato ad un miglioramento del Metodo Fattoriale attraverso l'introduzione di dati stocastici e di curve di distribuzioni probabilistiche per i diversi fattori.
Il Metodo Fattoriale classico, infatti, restituisce semplicemente un valore di vita utile che può essere inteso come vita utile media del componente studiato. Per una corretta programmazione della manutenzione, tuttavia, questo tipo di informazione è poco utile, se non accompagnata in qualche modo da indicazioni legate alla variabilità della vita utile, ovvero legate alla probabilità di non accadimento di guasto del componente edilizio nell'arco di tempo che va dal cosiddetto "tempo zero" al tempo di durata o tempo di vita utile spontanea del componente stesso in esercizio.
Solo grazie a questo tipo di informazione, infatti, si potranno individuare le strategie manutentive più idonee per l'attivazione dei diversi interventi manutentivi, in ragione della significatività del guasto considerato.

Un esempio di sviluppo del Metodo Fattoriale verso una versione probabilistica è stato dato, tra gli altri, da Moser [1999], che ha usato le definizioni del Metodo Fattoriale ma impiegando variabili di natura probabilistica al posto di puri valori deterministici.
Le variabili sono basate su dati forniti dai produttori, da prove di laboratorio, dall'esperienza, dall'opinione di esperti, ecc.
Per risolvere il problema dell'acquisizione di dati in tutti i casi in cui i dati non sono immediatamente disponibili, viene utilizzato il cosiddetto metodo ricorsivo di Delphi, costituito da tre fasi principali:

[30] Le cosiddette "deem-to-satisfy rules"
[31] DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures

- In un primo momento, viene riunito un gruppo di esperti ai quali viene chiesta un'opinione professionale sul tipo di distribuzioni da attribuire ai differenti fattori, sui loro valori medi e sulle deviazioni standard. Usualmente professionisti del settore riescono a definire abbastanza precisamente dei frattili (ad esempio 5% e 95%);
- Il secondo passaggio implica il calcolo della vita utile utilizzando come input i dati forniti dagli esperti. Le distribuzioni statistiche individuate vengono usate al posto dei fattori puri in formulazioni matematiche per la determinazione della vita utile;
- L'ultimo passaggio è rappresentato da una discussione dei risultati e dei principali parametri. Analisi di sensitività, in questa fase, si sono rivelate un utile strumento. Spesso i dati o i modelli devono essere aggiustati per fornire risultati giudicati ragionevoli. Dopo questa ricorsione, in cui vengono affinati il modello e le distribuzioni dei fattori, il problema può essere affrontato abbastanza agevolmente.

La **fig. 5.4** mostra le condizioni rilevanti per tutti i fattori, per un caso di studio dato da un edificio rettangolare di dimensioni, in pianta, pari a 50 x 25 m, con le facciate principali rivolte a nord e a sud. I tre frattili (5%, 50% e 95%) sono stati definiti attraverso il metodo di Delphi illustrato precedentemente.

Factor		Face	Relevant conditions	Factors for the fractiles 5% / 50% / 95%
A	Quality of component	all	general variations of components	1.2 / 1.5 / 1.8
B	Design level	all	good, identical value	1.2
C	Work execution level	all	general variation, but insufficient quality repaired	1.0 / 1.2 / 1.5
D1	Indoor environment	S	occasional risk of condensation	0.9 / 1.0 / 1.2
		W	medium risk of condensation	0.8 / 0.9 / 1.1
		N	high risk of condensation	0.7 / 0.8 / 0.95
		E	medium risk of condensation	0.8 / 0.9 / 1.1
D2	Outdoor environment	S	occasional cycling dry / damp	0.8 / 1.0 / 1.3
		W	regular cycling dry / damp	0.6 / 0.8 / 1.0
		N	sheltered from rain	1.0 / 1.2 / 1.5
		E	occasional cycling dry / damp	0.8 / 1.0 / 1.3
E	In use conditions	S	occasional access by children [1])	0.8 / 1.0 / 1.2
		W	regular access by children [1])	0.6 / 0.8 / 1.0
		N	occ. / reg. access by children [1])	0.7 / 0.9 / 1.1
		E	occasional access by children [1])	0.8 / 1.0 / 1.2
F	Maintenance level	all	painted on judgement of caretaker	0.9 / 1.0 / 1.1

Fig. 5.4 – Frattili stimati

I valori dei frattili che compaiono nella figura precedente sono approssimati dalle funzioni di probabilità di **fig. 5.5**. Le funzioni scelte rappresentano quelle generalmente utilizzate: distribuzione deterministica, normale, log-normale e di Gumbel. I dati processati consentono di ottenere per ogni facciata dell'edificio una predizione di vita utile in termini di valore medio e di deviazione standard.

Factor	Type of Distribution	Face			
		South	West	North	East
		m / s	*m / s*	*m / s*	*m / s*
RSLC	Deterministic	25 years	25 years	25 years	25 years
A	Normal	1.5 / 0.185	1.5 / 0.185	1.5 / 0.185	1.5 / 0.185
B	Deterministic	1.20	1.20	1.20	1.20
C	Gumbel	1.25 / 0.10	1.25 / 0.10	1.25 / 0.10	1.25 / 0.10
D1	Lognormal	1.05 / 0.10	0.95 / 0.10	0.80 / 0.10	0.95 / 0.10
D2	Lognormal	1.05 / 0.20	0.80 / 0.20	1.25 / 0.20	1.05 / 0.20
E	Normal	1.0 / 0.12	0.80 / 0.12	0.90 / 0.12	1.0 / 0.12
F	Normal	1.0 / 0.06	1.0 / 0.06	1.0 / 0.06	1.0 / 0.06
ESLC (years)	Lognormal [1])	62.0 / 20.4	34.2 / 11.8	50.6 / 14.8	56.1 / 18.6

Fig. 5.5 – Distribuzioni di predizioni di vita utile

I risultati di ESL delle quattro facciate sono mostrati in **fig. 5.6**.

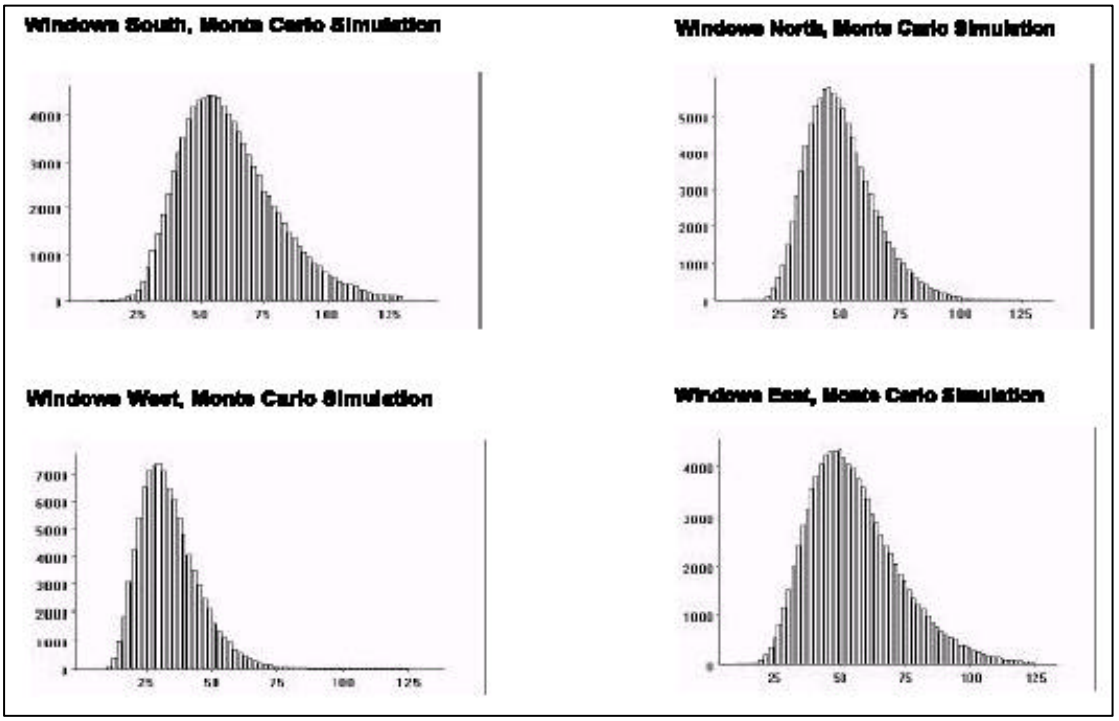
Windows South, Monte Carlo Simulation
Windows North, Monte Carlo Simulation
Windows West, Monte Carlo Simulation
Windows East, Monte Carlo Simulation

Fig. 5.6 – ESL delle quattro facciate dell'edificio

Dall'osservazione delle ESL, appare subito chiara l'importanza della natura probabilistica di queste grandezze, che consente di svolgere considerazioni in merito alla pianificazione delle strategie manutentive, nonché all'allocazione dei costi di manutenzione degli elementi tecnici studiati.

Cap. 6 – Progettazione e programmazione della manutenzione

Abbiamo visto fin dal capitolo 1 come la valutazione di durabilità dei componenti edilizi non debba essere considerata un problema a se stante ma, al contrario, vada inquadrata in un'ottica di ottimizzazione del rapporto costi – benefici.
In questo senso indagare la qualità tecnologica utile, ovvero l'attitudine dell'elemento tecnico a mantenere nel tempo adeguati livelli di prestazione tecnologiche iniziali (caratterizzanti la qualità tecnologica al tempo zero) si rivela un passaggio fondamentale per una corretta progettazione e programmazione della manutenzione edilizia.
In particolare, solo la disponibilità di informazioni sulla durata e sulla probabilità di raggiungere il tempo di durata (cioè globalmente sulla durabilità) consentirà una progettazione coerente con gli obiettivi di costo globale prefigurati dall'individuazione dell'intervento. La conoscenza e la successiva attribuzione di connotazioni durabilistiche ai prodotti edilizi costituisce pertanto uno dei momenti chiave per la definizione della qualità globale di un'opera, rendendone attuabili il controllo ed il governo dei costi globali durante il ciclo di vita della stessa.
Come si può capire, l'interesse della trattazione si sposta a questo punto su un'altra componente della qualità tecnologica; la qualità tecnologica manutentiva.
Questa particolare articolazione della qualità tecnologica dei componenti edilizi trova concretezza nella "*propensione alla manutenibilità*" posseduta da un'opera edilizia intesa come attitudine a consentire l'esecuzione di interventi manutentivi ragionevolmente economici. Questi caratteri sono conferiti all'opera edilizia e ai suoi componenti nella fase decisionale, pertanto la manutenibilità costituisce un vero e proprio requisito di progetto strettamente dipendente dalla durabilità.
Il requisito di manutenibilità, indicante l'attitudine all'operabilità della manutenzione, concentra in una definizione cumulativa i contenuti relativi a più requisiti elementari, che ne costituiscono l'articolazione: ispezionabilità, accessibilità, distinguibilità, smontabilità, riparabilità e sostituibilità.
In riferimento alle definizioni riportate nella letteratura tecnica al riguardo, essi possono essere così descritti:

- **Ispezionabilità**: attitudine dei subsistemi tecnologici e degli elementi tecnici che li costituiscono (in particolare quando sono destinati ad essere usati e manovrati direttamente dagli utenti) ad essere ispezionabili e controllabili, al fine di evitare eventuali guasti e facilitare i necessari interventi manutentivi;
- **Accessibilità**: attitudine dei subsistemi tecnologici e degli elementi tecnici che li costituiscono ad essere facilmente raggiungibili, al fine di compiere interventi manutentivi in adeguate condizioni di sicurezza e di comfort. La necessità di impedire la corretta fruizione degli spazi attigui alla soluzione tecnica indica basso (ma non nullo) livello di soddisfacimento del requisito.
- **Distinguibilità**: attitudine ad una chiara intelligibilità della disposizione costruttiva e ad una chiara definizione dei ruoli delle parti componenti grazie ad una differenziazione (sia fisica che funzionale) dei componenti della soluzione tecnica;
- **Smontabilità**: attitudine di una soluzione tecnica ad essere scomposta in modo reversibile nei singoli elementi costituenti (per agevolare il rinnovo e limitare le sostituzioni quando

si rende necessaria la riparazione), senza il ricorso a mezzi impegnativi di movimentazione;
- **Riparabilità**: attitudine a consentire la riparazione delle parti rotte o usurate di elementi tecnici, soprattutto se complessi e formati da parti con obsolescenza differenziata. Gli interventi di riparazione possono richiedere smontaggi e rimontaggi, come pure l'intervento di operatori specializzati;
- **Sostituibilità**: attitudine degli elementi tecnici con obsolescenza fisica o funzionale più rapida ad essere facilmente sostituibili, al fine di aumentare la durata complessiva dei subsistemi e di non interromperne l'uso. Gli interventi di sostituzione, che richiedono smontaggi e rimontaggi e che prevedono l'intervento di operatori specializzati, non devono causare danni di nessuna natura ad elementi od opere circostanti. La sostituibilità è altresì definita come l'attitudine di una soluzione tecnica ad essere agevolmente asportata (a seguito di scomposizione potenzialmente reversibile o a scomposizione irreversibile che non richiede mezzi di demolizione impegnativi) ed integralmente rimpiazzata da altra.

E' evidente che quanto maggiore é il soddisfacimento di detti requisiti, tanto più l'intervento manutentivo può essere agevolmente attuato, con semplificazione delle risorse necessarie e dei tempi implicati: ciò equivale a dire in sostanza che l'intervento manutentivo può essere meno costoso. E l'intera fase gestionale del processo edilizio può essere tanto meno costosa quanto minore é il numero di guasti che si verificano nel periodo di uso del bene edilizio e, di conseguenza, diviene minore in generale il numero di interventi manutentivi necessari alla loro risoluzione.
Sarà cura del progettista dunque, una volta individuati i prodotti tali da garantire un'adeguata qualità tecnologica caratteristica (al tempo "zero"), far ricadere le proprie scelte sui prodotti disponibili sul mercato tali da garantire all'opera edilizia articolata nei diversi sub-sistemi adeguate prestazioni di durabilità e manutenibilità.

6.1 Degrado, obsolescenza e patologia

Prima di entrare nel merito di questi argomenti, chiarendo come e quando intervenire, si impongono alcune riflessioni in merito alla *necessità* dell'intervento manutentivo; queste considerazioni prendono spunto dal fatto che l'oggetto "abitazione", alla pari di qualsiasi altro oggetto, è concepito e realizzato per fornire una risposta ad una domanda. Nel nostro caso, in particolare, la domanda è costituita da una serie di requisiti più o meno espliciti che, tanto per restare in ambito normativo, possono essere fatti coincidere con i sei requisiti essenziali della Direttiva "Prodotti da Costruzione", cui andrà aggiunto il requisito di durabilità, trasversale a quelli elencati nel documento comunitario. Analogamente, *rispondere alla domanda* significa possedere l'insieme dei requisiti necessari per consentire lo svolgimento di un insieme di funzioni. La necessità di intervenire con le attività manutentive di cui si è detto nelle pagine precedenti è strettamente correlata all'equilibrio tra domanda e risposta; tale equilibrio risulta essere, di fatto, un equilibrio *dinamico*, nel senso che, seppur molto lentamente, sia la domanda che la risposta sono suscettibili di subire processi di trasformazione, secondo quanto segue:

- **Variazione della risposta:** cambiano le **prestazioni**. E' il caso più comune che porta all'intervento edilizio. Fenomeni di **degrado fisico** (naturale o accelerato) portano ad un comportamento tecnologico insufficiente l'elemento tecnico che, pertanto, **non funziona più**;

- **Variazione della domanda:** cambiano i **requisiti**. In questo caso l'intervento si impone anche a fronte di un comportamento tecnologico ancora qualitativamente valido, poiché l'elemento tecnico **non è più adatto**; sarebbe allora più corretto parlare di **obsolescenza**. Si pensi ad esempio a cambiamenti sopraggiunti nel quadro legislativo, negli standard o nelle norme tecniche, che impongono vincoli nuovi alle soluzioni precedentemente adottate.

Chiarito dunque questo primo punto, di natura prevalentemente terminologica, e preso atto che (seppur filosoficamente parlando) col termine degrado si intende un progressivo deterioramento più o meno grave dell'integrità fisica di un organismo edilizio o di una sua parte, si vuole ora mettere in luce un altro aspetto, legato al significato di **patologia**.
Tale termine, purtroppo, è spesso adottato come sinonimo di degrado o guasto. In realtà, e più esattamente, il termine in questione nasce per identificare un ben preciso processo di invecchiamento, che si manifesta laddove il decadimento fisico si sviluppa in termini temporali inattesi. Questo fenomeno, cui viene attribuita convenzionalmente la definizione di **invecchiamento accelerato**, è dunque associato ad alterazioni che scardinano le consuete logiche di invecchiamento naturale, comunemente accettate per una determinata tipologia costruttiva su cui è articolato un elemento tecnico. Peraltro, questo particolare tipo di degrado, tanto più pericoloso quanto più imprevedibile, può essere ricondotto ad errori umani, e quindi sopraggiungere per sbagli od omissioni progettuali, costruttive o, infine, per scorretta o mancata manutenzione durante l'esercizio dell'opera.

Per meglio comprendere se si è in presenza di una patologia edilizia, può essere utile parlare del **tasso di degrado** di un oggetto edilizio. Come abbiamo già avuto modo di vedere, il degrado è funzione della sensibilità di un elemento o di un prodotto ad un determinato agente; in altre parole, le sue alterazioni sono legate alle particolari condizioni d'uso e di sollecitazione cui sarà soggetto in esercizio. In contesti ambientali particolarmente sollecitanti, è possibile che il tasso di degrado risulti estremamente elevato; ciò nondimeno, ci troveremo di fronte ad un tipo di invecchiamento naturale, dal momento che una corretta progettazione dovrebbe tenere conto della contestualizzazione dell'edificio e, di riflesso, produrre un'opera che sia in grado di resistere ad un ambiente (per quanto ostile) fino al periodo di fine di vita utile.
Si pensi ad esempio ad un'opera infrastrutturale (quale potrebbe essere un ponte) da realizzarsi in un'importante città posta sul mare; è chiaro che il carico ambientale, sia in termini di inquinamento (di aria ed acqua) che in termini di attacchi da cloruri sarà estremamente elevato. Il tasso di degrado associato all'opera sarà anch'esso notevole, sebbene l'invecchiamento rimanga di tipo naturale (a meno che non si sia in presenza di difetti e, quindi, di patologie).

Pertanto, **la discriminante tra invecchiamento naturale ed accelerato[32] è costituita dal tempo di comparsa del guasto, che nel caso della patologia si presenta anticipata anormalmente rispetto alla speranza di vita utile[33]** (cfr. **figura 6.1**).

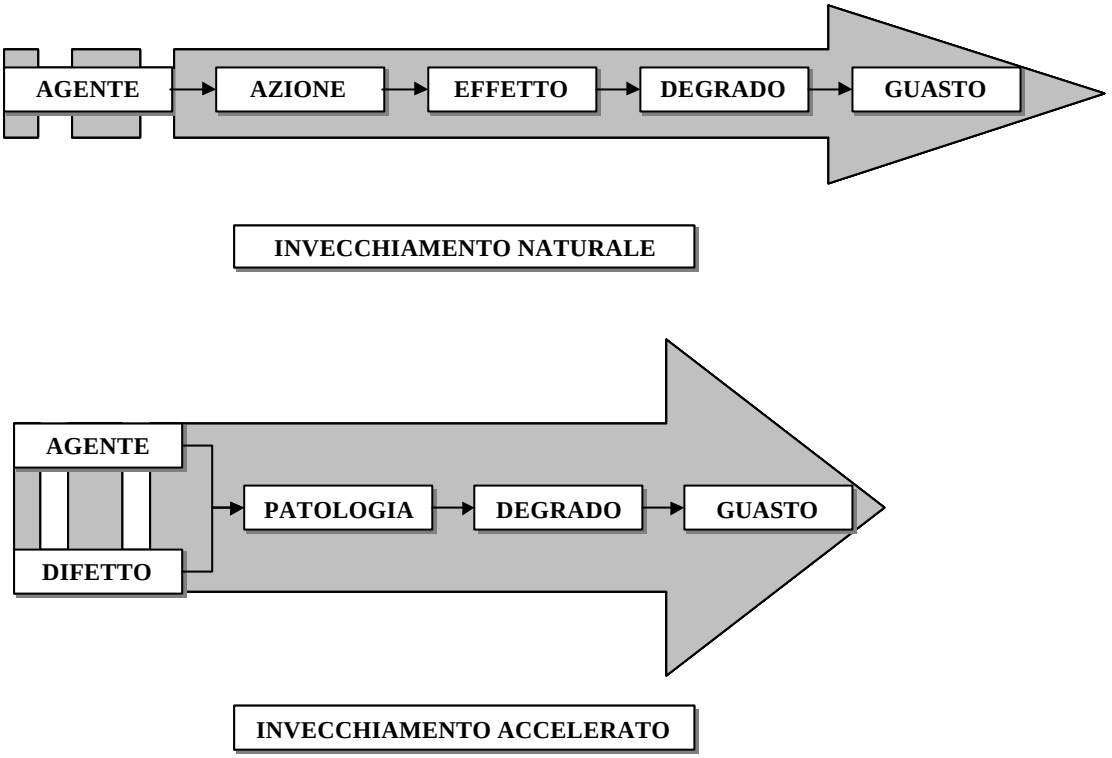

Fig. 6.1 – Schematizzazione dei differenti modi e tempi di invecchiamento

6.2 I parametri di valutazione della manutenibilità

La valutazione del grado di manutenibilità di un oggetto edilizio attraverso i requisiti elementari appena definiti può essere condotta in maniera semplificata tramite l'individuazione dell'appartenenza a classi caratterizzate da differenti intensità. Dire che un elemento possiederà un'ispezionabilità di classe "i" ed una sostituibilità di classe "j" fornirà tuttavia indicazioni di tipo qualitativo e comunque soggettivo, data la difficoltà di individuare ed enunciare criteri univoci tramite i quali operare la formazione delle classi e pervenire al riconoscimento dell'appartenenza della propensione prestazionale alla singola classe.

[32] Si faccia attenzione a non confondere il concetto di invecchiamento accelerato esposto in questa sede con quello già incontrato in ambito ISO. In questo caso "accelerato" è sinonimo di "patologico"; l'invecchiamento accelerato di cui si parla all'interno dello standard ISO 15686 (nel caso di prove di laboratorio o di esposizioni in esterno particolarmente sfavorevoli) va dunque inteso come un invecchiamento ad elevato tasso di degrado.

[33] Ricordiamo in questa sede la definizione fornita dalla Commissione CIB W086 "Building Pathology", per la quale la "patologia edilizia" rappresenta quella disciplina che studia "i fattori processuali, umani, ambientali, tecnici, tecnologici, fisici, chimici (fattori di disturbo) e i meccanismi interattivi che portano in tempi anormalmente ravvicinati ad alterazioni di tipo fisico o di tipo prestazionale di un elemento tecnico del sistema edilizio (…) In edilizia si ha quindi patologia laddove i decadimenti (fisici o prestazionali) si sviluppano in termini temporali e qualitativi inattesi e contrastanti con il concetto convenzionale di invecchiamento naturale…"

Risulta più pratico allora valutare il grado di manutenibilità tramite la probabilità che un elemento sia conforme alle condizioni prestabilite (livello prestazionale di progetto e posseduto al momento della sua entrata in esercizio) entro un determinato periodo di tempo durante il quale viene compiuta l'azione di manutenzione con procedure e risorse prescritte.
Tale probabilità, detta "*disponibilità*", rappresenta l'"attitudine di un'entità ad essere in grado di svolgere una funzione richiesta, in determinate condizioni, in un particolare istante o durante un dato intervallo di tempo, partendo dal presupposto che siano fornite le risorse esterne necessarie" [34].

In termini matematici, la disponibilità "D" può essere convenientemente rappresentata dalla seguente relazione:

$$D = \frac{TMBF}{TMBF + TMDR}$$

dove:

- TMBF é il Tempo Medio di Buon Funzionamento, che indica il periodo di vita utile previsto o "durata spontanea", ed esprime la speranza matematica della durata di vita;
- TMDR é il Tempo Medio Di Riparazione per la risoluzione dei possibili plausibili guasti.

Per un qualsiasi elemento tecnico un'alta disponibilità richiede un basso tempo medio di riparazione (TMDR), rispetto al suo tempo medio di buon funzionamento (TMBF).
Indicativamente un elemento tecnico si considera dotato di una buona disponibilità per valori tali per cui D 0,8.
Sotto tale valore, un intervento manutentivo volto a ripristinare la capacità di funzionamento perduta dall'intero sistema edilizio o da una sua parte risulta non essere più conveniente sotto l'aspetto squisitamente economico, come mostrato in **figura 6.2**.

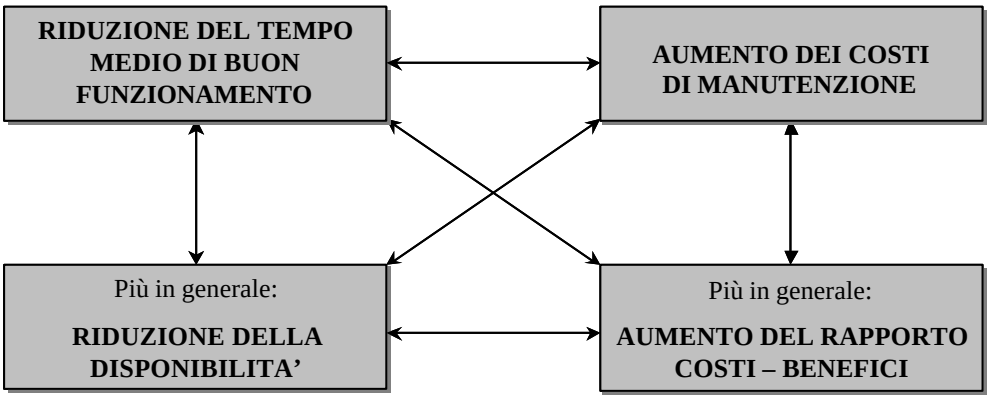
RIDUZIONE DEL TEMPO MEDIO DI BUON FUNZIONAMENTO
AUMENTO DEI COSTI DI MANUTENZIONE
Più in generale:
RIDUZIONE DELLA DISPONIBILITA'
Più in generale:
AUMENTO DEL RAPPORTO COSTI – BENEFICI

Fig. 6.2 – Convenienza economica dell'intervento manutentivo

Riferito all'intera soluzione tecnica, il valore di TMDR (media aritmetica dei TMDR di tutti potenziali plausibili guasti che possono interessare i vari elementi funzionali della soluzione stessa) consente di valutare (noto il TMBF dell'intera soluzione) un valore utile in prima

[34] UNI EN 13306:2003 *Manutenzione – Terminologia*

approssimazione per confrontare i livelli di qualità manutentiva di più soluzioni tecniche appartenenti alla stessa classe di elementi tecnici, ma non significativo ai fini delle scelte delle strategie manutentive da adottare.
Ai fini di una razionale programmazione degli interventi manutentivi è necessario che il TMDR sia calcolato in termini analitici per ciascun elemento funzionale della soluzione tecnica in questione, attraverso una media statistica della distribuzione dei tempi di riparazione per componenti o insiemi di componenti.
Per quanto riguarda il TMBF, questo costituisce l'output della progettazione tecnologica che, se correttamente impostata, consente di mettere a punto il comportamento globale dell'oggetto sia relativamente alle prestazioni immediatamente fornibili, sia relativamente alle prestazioni di comportamento nel tempo (in termini di durata di vita e di probabilità di raggiungere il tempo di durata).

La **figura 6.3**, alla stregua della figura 2.6 nel caso della durabilità, mostra la collocazione dei parametri di valutazione della manutenibilità all'interno della qualità tecnologica.

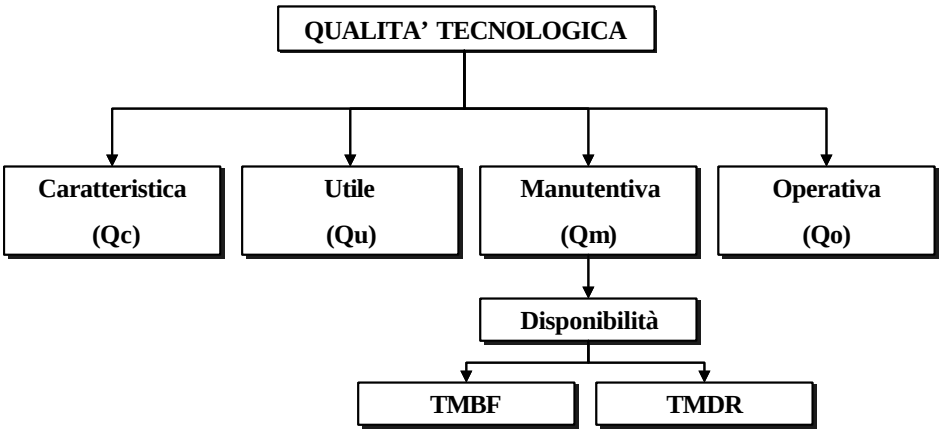

Fig. 6.3 – I parametri di valutazione della manutenibilità

6.3 Progettare la manutenzione

Progettare la manutenzione di un organismo edilizio e delle sue parti significa prevedere le condizioni per le quali la manutenzione stessa dovrà attivarsi; significa cioè prevedere i possibili e plausibili guasti di un edificio e progettare gli interventi per la loro risoluzione.
Ai fini dell'impostazione di una corretta progettazione della manutenzione si dovrà pertanto procedere nella seguente maniera:

1) Scomporre l'organismo edilizio in elementi funzionali costitutivi; in particolare il sistema tecnologico può essere scomposto facendo riferimento alla classificazione normata dalla UNI 8290-1. Ogni subsistema individuato andrà a sua volta analizzato e scomposto negli elementi tecnici componenti, proseguendo fino al livello di componente edilizio.

2) Condurre un'adeguata analisi agenti – azioni – effetti; in questa fase il progettista dovrà curarsi soprattutto di alcuni peculiari aspetti dell'intervento che, se trascurati, potrebbero portare a risultati fuorvianti e/o incompleti. In particolare sarà di fondamentale importanza:

- Individuare gli agenti che si manifestano con bassa intensità ma la cui ciclicità e/o durata nel tempo ne renderebbero critici gli effetti nel lungo periodo;
- Individuare possibili sinergie tra agenti la cui azione contemporanea potrebbe portare ad effetti superiori a quelli comunemente riconosciuti; inoltre, parecchi fenomeni si attivano proprio in presenza di due o più agenti (basti pensare alla corrosione, che può avere luogo solo in presenza di acqua ed ossigeno);
- Contestualizzare l'intervento per definire correttamente il carico ambientale agente sulla struttura, e principalmente sull'involucro edilizio; quanto più approfondita risulterà quest'analisi, tanto più sarà possibile prevedere il corretto comportamento nel tempo dell'opera. L'influenza delle azioni ambientali, per essere correttamente valutata, dev'essere stimata alla luce di tre differenti livelli di analiticità:

  - **Condizioni macroclimatiche:** si parla anche di "*condizioni regionali*".

  Si assume che tutte le parti della struttura sia assoggettate alle stesse condizioni ambientali (come ad esempio per la definizione della zona di vento, neve, …);

  - **Condizioni mesoclimatiche:** si parla anche di "*condizioni locali*".

  Questo tipo di analisi entra in gioco per considerazioni di tipo morfologico-geometrico della struttura. L'importanza della geometria e dell'orientamento delle diverse superfici della struttura è fondamentale per una sua corretta progettazione (problemi di stravento, di condensa superficiale ed interstiziale...);

  - **Condizioni microclimatiche:** si parla anche di "*condizioni prossime alla superficie*".

  Vanno tenute nella giusta considerazione per lo studio di nodi progettuali e di dettagli costruttivi, nonché per la corretta scelta dei materiali costituenti la soluzione tecnica da adottare. Il microclima rappresenta le condizioni di esposizione effettivamente esistenti a contatto con la superficie della struttura; esso può essere diverso dal macroclima e, con riferimento alla struttura, diverso da zona a zona. A causare diversità e variabilità concorrono i dettagli di progetto e situazioni particolari che si manifestano durante il servizio.

3) Identificare i possibili e plausibili guasti tramite la significatività degli effetti; ove gli eventi di guasto di ciascun componente non possano ritenersi indipendenti l'uno dall'altro (condizione tipica dell'ambiente edilizio), possono essere utilizzati strumenti quali il FMEA[35] e/o il FTM[36].
   L'analisi dei modi e degli effetti dei guasti (FMEA) è un metodo analitico di tipo "induttivo" finalizzato allo studio sistematico delle cause e degli effetti più frequentemente ricollegabili ad eventi di guasto che possono colpire i componenti di un sistema, mentre l'albero dei guasti (FTM) è un diagramma logico che mette in relazione i guasti dei singoli componenti (o "guasti primari") con il guasto del sistema (o "guasto finale"), laddove tale guasto rappresenta l'effetto finale indesiderato corrispondente a uno dei possibili modi di guasto del sistema stesso.

4) Analizzare i piani operativi di esecuzione e i piani particolari di sicurezza; l'acquisizione delle informazioni presenti in tali documenti risulterà di primaria importanza per la stesura

[35] FMEA – Failure Modes and Effects Analysis
[36] FTM – Fault Tree Method

del piano operativo di manutenzione, dal momento che vi si potranno trovare indicazioni relative alle risorse, ai materiali, ai mezzi d'opera, alla manodopera ed infine ai tempi necessari per la realizzazione dell'elemento tecnico.

5) Progettare gli interventi manutentivi di riparazione, sostituzione, demolizione e ricostruzione sulla base delle conoscenze acquisite durante la fase precedente. Questo processo si sostanzia nell'elaborazione dei **piani di manutenzione** accompagnati dai **piani particolari di sicurezza**. Detti piani andranno compilati in conformità alla struttura prevista dalla UNI 10756[37]. La redazione dei piani operativi di manutenzione consente, mediante l'attribuzione dei corrispondenti costi alle risorse implicate, di addivenire ad una stima dell'intervento da eseguire.

   Ciò renderà più facilmente praticabile la preventivazione dei costi di manutenzione e la valutazione della sostenibilità tecnica ed economica dell'intervento.

La progettazione della manutenzione, che si esaurisce con la redazione dei piani di manutenzione e di sicurezza, consente un'allocazione di risorse temporali ed economiche per gli interventi da svolgere a fronte di tutti i possibili e plausibili guasti.
Una corretta progettazione consentirà di rispondere a domande del tipo:

- **QUANTO** costa un intervento?
- **PERCHE'** si rende necessario?
- **COME** va realizzato?

In riferimento alla parte impiantistica dell'opera, la progettazione delle modalità di gestione degli impianti si traduce nella elaborazione dei **piani di esercizio.**
L'elaborazione dei piani di esercizio consente di completare la **progettazione gestionale** dell'intervento.

6.4 Programmare la manutenzione

La programmazione della manutenzione consiste nell'adozione della strategia manutentiva più adeguata alle caratteristiche del guasto, alla modalità di entrata in stato di guasto tipica dell'elemento, alle caratteristiche durabilistiche dell'elemento tecnico, al periodo di vita del componente e alla previsione del costo complessivo attualizzato in un'ottica di ottimizzazione del rapporto costi-benefici.
Si deve comunque osservare che proprio le caratteristiche dei criteri che possono influenzare le decisioni in merito alle strategie manutentive da adottare fanno sì che la scelta possa variare da elemento ad elemento e, per uno stesso elemento, possa mutare nel tempo. Sarà preferibile dunque adottare per uno stesso edificio un mix dinamico di forme di manutenzione più convenienti nell'arco di un certo periodo di tempo. Una prima classificazione distingue le diverse strategie manutentive a seconda dei tempi di svolgimento e degli scopi in:

- **Strategie manutentive correttive**: riguardano manutenzioni eseguite *a seguito* della rilevazione di un'avaria e volte a riportare l'elemento tecnico nello stato in cui esso possa nuovamente eseguire la funzione richiestagli;

[37] UNI 10756:1998 *Edilizia – Progettazione operativa di cantiere – Definizioni, struttura e contenuti dei piani operativi per interventi di nuova costruzione*

- **Strategie manutentive preventive**: riguardano manutenzioni eseguite *prima* della rilevazione di un'avaria e volte a ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di un elemento tecnico.

Le principali forme manutentive comunemente riconosciute sono così definite:

- **Manutenzione di emergenza:** è detta anche "accidentale", e riguarda gli stati di guasto imprevedibili che possono manifestarsi nel periodo di vita utile; in questo senso è praticabile solo "a guasto avvenuto";
- **Manutenzione a guasto avvenuto:** manutenzione attivata a seguito della rilevazione del guasto; è volta a riportare l'elemento in condizioni di corretto funzionamento, motivo per cui in alcuni ambiti è detta riparativa. Si differenzia dalla manutenzione di emergenza perché riguarda anche stati di guasto che possono o potrebbero essere previsti in anticipo; se si pone come scelta operata in coerenza con la disponibilità dei dati di affidabilità e durata dell'elemento tecnico che si prende in esame rientra appieno nel concetto di manutenzione programmata;
- **Manutenzione preventiva:** manutenzione eseguita in tempi o ad intervalli temporali definiti, volta a prevenire l'accadimento del guasto. E' detta anche predittiva "di soglia", e può distinguersi in manutenzione preventiva di soglia *ad età costante* e manutenzione preventiva di soglia *ad intervalli costanti*;
- **Manutenzione sotto condizione:** manutenzione eseguita prima della perdita della funzionalità, subordinata al raggiungimento di un valore limite predeterminato. La strategia sotto condizione è preventiva e la condizione per l'attivazione dell'intervento manutentivo è data dagli esiti delle ispezioni condotte sull'elemento nei confronti delle indicazioni fornite dalla scheda diagnostica;
- **Manutenzione di opportunità:** manutenzione condotta su più componenti in corrispondenza di una opportunità di intervento, a seguito dell'attivazione di un altro intervento, primario, programmato o determinato da emergenza, tale da realizzare sincronie e sinergie nell'impiego di risorse tecniche, organizzative ed economiche.

La **figura 6.4** fornisce un quadro generale delle principali categorie e forme di manutenzione. Va notato come la manutenzione di opportunità possa trovare spazio sia come strategia di tipo preventivo che correttivo.

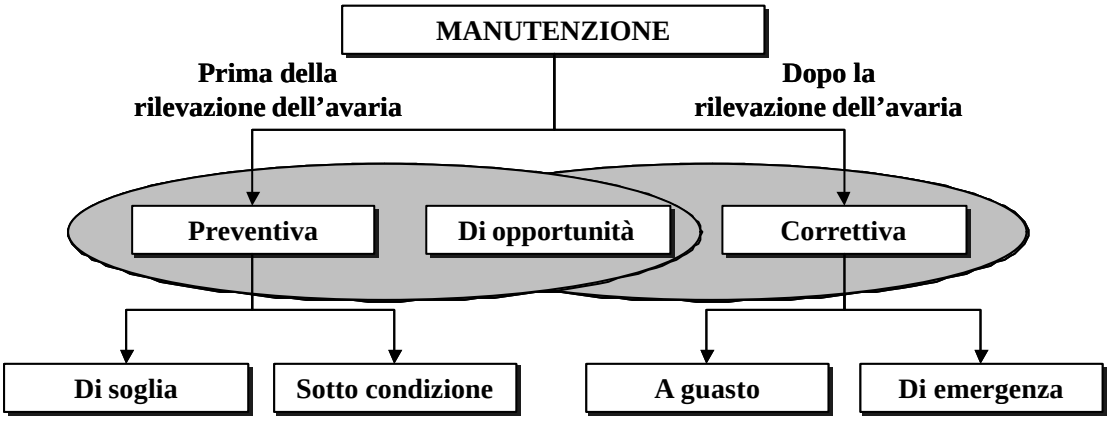

Fig. 6.4 – Classificazione delle principali forme di manutenzione

6.4.1 Criteri di scelta delle strategie manutentive

L'individuazione di un'adeguata strategia manutentiva è senz'altro uno dei momenti più delicati della programmazione gestionale dell'intervento, dal momento che i costi delle attività di manutenzione (e soprattutto la loro distribuzione lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio) sono fortemente influenzati dall'articolazione più o meno complessa di forme manutentive individuate per contrastare al meglio fenomeniche di degrado ed obsolescenza del sistema edilizio.

La scelta di una strategia manutentiva avviene generalmente a valle di un processo attraverso il quale vengono esaminati tutta una serie di fattori, tra i quali:

- **L'importanza del guasto**: andrà valutata la possibilità che sia compromesso il funzionamento dell'elemento tecnico e/o del sistema di elementi. Un'analisi funzionale del componente in questa fase può rivelarsi di grande utilità;
- **La criticità del guasto**: andranno valutate le possibili ripercussioni (in termini di sicurezza e/o benessere) che potrebbero coinvolgere gli utenti a seguito della comparsa di un evento di guasto;
- **Il costo dell'intervento manutentivo**: andranno considerati, oltre al costo dell'elemento in sé, i costi di sostituzione o di demolizione e successiva ricostruzione, necessari all'adeguamento tecnologico-funzionale della parte indagata, sulla scorta delle indicazioni fornite dai piani operativi di manutenzione;
- **La natura dell'elemento**: la prevedibilità di accadimento di un guasto risulta fortemente influenzata dalla natura (bistabile – non bistabile) dell'elemento. Va ricordato che la prima è caratterizzata da un repentino passaggio dallo stato di funzionamento a quello di non funzionamento, mentre la seconda da un passaggio graduale;
- **La disponibilità di dati di tipo durabilistico**: quanto più numerose saranno le informazioni in termini di durata ed affidabilità (o "propensione all'affidabilità", secondo quanto detto in § 4.4) tanto più precise si riveleranno, ovviamente, le strategie manutentive adottate. Informazioni circa il tasso di guasto (il parametro più significativo, rappresentando l'affidabilità istantanea e il numero di guasti nell'unità di tempo) sono estremamente scarse e di difficile reperibilità;
- **Il periodo di vita del componente**: l'adozione di una strategia manutentiva piuttosto che un'altra dipenderà anche dal momento in cui questa avverrà all'interno del ciclo di vita dell'edificio, che può essere scomposto in rodaggio, vita utile, usura (periodi caratterizzati da tre differenti andamenti del tasso di guasto).

Quanto messo in luce poco sopra consente di poter affermare che:

- La **strategia manutentiva a guasto avvenuto** può convenientemente essere adottata nel caso di elementi bistabili e non bistabili, a patto che la funzione svolta dall'elemento non sia classificabile come "critica". Può essere adottata nel periodo di usura per guasti prevedibili, in base ai valori di durata e affidabilità o a seguito degli esiti delle ispezioni. Per elementi caratterizzati da elevati valori di durata ed affidabilità al tempo di durata, il guasto (non critico) ha grande probabilità di accadere nel periodo di usura e ciò consente di ritardare l'attivazione dell'intervento;

- La **strategia preventiva di soglia a età costante** è praticabile per elementi bistabili e non bistabili, nel periodo di vita utile, al tempo medio di buon funzionamento, relativa a guasti prevedibili in base ai valori di durata e affidabilità documentati con certezza dalle schede tecniche del componente su dati sperimentali, caratterizzati da guasti ad alta criticità. Per elementi tecnici bistabili può essere adottata per prevenire guasti imprevedibili nel periodo di vita utile, e nel qual caso è programmata al tempo medio di vita utile. Per elementi non bistabili può essere adottata per prevenire guasti altamente critici, imprevedibili nel periodo di vita utile, e viene programmata al tempo medio di vita utile. Si può applicare anche ad elementi funzionali ai quali è demandata totalmente una funzione critica, il cui guasto può innescare una proliferazione di guasti conseguenti, e per i quali la funzione si configura bistabile (ad esempio le guaine impermeabilizzanti); in questo caso si opererà una sostituzione preventiva al tempo medio di vita utile;
- La **strategia preventiva di soglia a intervalli costanti** può essere adottata nel caso di interventi preventivi di sostituzione su elementi i cui guasti presentino alta criticità. Riguarda sia elementi bistabili che non bistabili, caratterizzati da analoghi valori di affidabilità oltre che da durate simili; in questo caso verrà programmata nel periodo di vita utile, al tempo medio di buon funzionamento;
- La **strategia sotto condizione** è praticabile per elementi non bistabili, nel periodo di vita utile, al tempo medio di buon funzionamento, per guasti prevedibili a seguito della conoscenza delle condizioni di funzionamento acquisite mediante controlli periodici, sulla scorta delle indicazioni delle schede diagnostiche. E' in genere adottata per guasti a bassa criticità.

La manutenzione di opportunità è costituita dall'insieme di interventi manutentivi programmati (preventivi di soglia, sotto condizione, a guasto) che si decide di anticipare per fruire dell'opportunità di della disponibilità delle risorse messe in gioco dagli interventi primari. Infine resta sempre presente, al di là di ogni possibilità di previsione, il verificarsi della necessità di ricorrere a interventi manutentivi di emergenza, a seguito di guasti accidentali; questi saranno tanto più frequenti quanto maggiore sarà il tasso di guasto, quindi la manutenzione di emergenza riguarderà soprattutto la fase di rodaggio, nonché quella di usura accelerata. Sarà inevitabile tuttavia praticarla anche durante il periodo di vita utile.
E' un tipo di manutenzione che si attiva a guasto avvenuto, non programmata, e della quale bisogna tener conto nella quantificazione delle risorse economiche da destinare periodicamente alla manutenzione di un bene edilizio.
Come già accennato, sarebbe auspicabile che ogni strategia di manutenzione non venisse vista in alternativa alle altre, e che quindi fossero praticabili strategie di intervento miste.

La programmazione della manutenzione si esaurisce nella redazione dei **programmi di manutenzione** (operativi, temporali ed economici), stesi tenendo conto delle istruzioni operative contenute nei piani di manutenzione predisposti dalla precedente progettazione gestionale dell'organismo ed integrate col preventivo economico delle attività programmate.
In riferimento alla parte impiantistica dell'opera, infine, le attività definite nel dettaglio dai piani di esercizio si tradurranno in **programmi di esercizio** (operativi, temporali ed economici) degli impianti tecnici, corredati dal calendario delle attività di gestione di ciascun impianto e dai relativi costi.
L'elaborazione dei piani di esercizio consente di completare la **programmazione gestionale** dell'intervento.

Una corretta programmazione consentirà di rispondere a domande del tipo:

- **QUANDO** andrà svolto l'intervento?
- **QUALE** strategia manutentiva risulta più adeguata?

Come già indicato nella prefazione, questo lavoro vuole fornire un contributo di natura metodologica alla risoluzione di tali problematiche.
In particolare nel prosieguo della tesi (parte 2) verranno mostrate metodologie in grado di restituire valori di durata spontanea di RSL e strumenti (come il Metodo Fattoriale) che permettono il passaggio da RSL ad ESL, consentendo quindi (con tutti i limiti che si portano dietro) un approccio di tipo quantitativo alla programmazione della manutenzione.
Verranno peraltro indagati (parte 3) altri metodi i cui risultati non si sostanzieranno nella restituzione di valori temporali di vita utile, ma che serviranno in ogni caso per compiere le scelte più opportune in fase decisionale nella progettazione di un oggetto tecnico.

I principali parametri governanti la durabilità di elementi tecnici e componenti edilizi saranno studiati in termini di "**propensione alla durata**" e "**propensione all'affidabilità**". Verrà mostrato come strumenti quali il PLM e il metodo per la stima della propensione all'affidabilità, se utilizzati in parallelo, come strumenti complementari l'uno all'altro, consentano di ricavare informazioni preziose per il progettista durante le prime fasi progettuali, quando ancora non è stata individuata la soluzione tecnica "ufficiale" da un repertorio più o meno vasto di soluzioni costruttive.
Infine, attraverso strumenti come il FMEA (e più in generale il FMECA[38]) si indagherà la possibilità di sviluppare vere e proprie **gerarchie dei guasti**, sia in termini di **gravità** del guasto che in termini di **probabilità di accadimento.**
Ciò peraltro getterà le basi per poter correttamente rispondere al secondo quesito, che prevede l'adozione della strategia manutentiva più adeguata. La scelta, come abbiamo visto, oltre che a dipendere dal momento dell'attuazione dell'intervento, andrà compiuta avendo ben chiare le conseguenze dei possibili e plausibili guasti.

[38] FMECA – Failure Modes, Effects and Criticality Analysis

2ª PARTE

Contributi all'attività di ricerca in ambito ISO

Cap. 7 – L'attività sperimentale per la determinazione della RSL

7.1 Da dove è nata la necessità di avviare il programma sperimentale

L'esigenza di impostare e condurre un programma sperimentale per la determinazione della RSL è nata come appendice naturale a valle di una più generale ricerca sulla valutazione della durabilità di componenti edilizi. Nei capitoli precedenti, infatti, è stato messo in luce un percorso metodologico che consente di determinare la durata di un componente o di una soluzione tecnica attraverso misure di caratteristiche funzionali, il cui degrado nel tempo viene correlato ad un decadimento delle prestazioni ambientali o tecnologiche. Il metodo dell'analisi funzionale e quello dei limiti prestazionali (PLM, di cui si dirà nel successivo capitolo 9) sono strumenti che, per essere applicati correttamente ed in modo analitico in fase decisionale, richiedono come dato di input la conoscenza dell'andamento nel tempo di quei parametri che governano e regolano le prestazioni correlate al comfort termoigrometrico dell'ambiente.
I limiti così individuati si configurano come vere e proprie soglie da non oltrepassare se si intende mantenere un livello di qualità ambientale tale da soddisfare gli standard minimi di benessere abitativo richiesti dal committente.
La necessità di determinare tali andamenti ha portato, come detto, all'avvio (nel 1996) di un programma sperimentale, la cui struttura ed i cui risultati verranno riportati nei paragrafi successivi.

7.2 Struttura del programma sperimentale

In questo paragrafo verranno brevemente ripresi i caratteri salienti legati alla struttura del programma sperimentale di ricerca, rimandando per maggiori informazioni a fonti bibliografiche più di dettaglio[39].
Il programma è stato strutturato in modo tale da essere il più possibile coerente con la metodologia per la previsione della vita utile di componenti edilizi proposta a livello internazionale dallo standard ISO 15686 ed esposta nel corso del § 4.1 di questo volume.
Il primo passo è stato quello di individuare la soluzione tecnica su cui lavorare, scelta tra le soluzioni costruttive più comuni nel panorama edilizio nazionale, in modo tale da rendere fruibili i risultati della ricerca a quanti più operatori possibili. La scelta è ricaduta pertanto su una chiusura pluristrato costituita da doppia muratura in laterizio, intonacata e con isolante interposto. In particolare, lo strato di finitura esterno è stato rivestito con una pittura per poterne valutare il grado di protezione nel tempo. Scelta la soluzione tecnica da cui partire, si è passati all'impostazione del programma sperimentale, caratterizzato da due scelte di fondo:

- La prima scelta è stata quella di svolgere in parallelo prove accelerate di laboratorio (quindi in ambiente condizionato di riferimento) e prove di invecchiamento naturale (ovvero in esterno), verificandone in seguito la possibilità di re-scaling temporale dei risultati: tale operazione sarà possibile solamente a seguito di una validazione data dalla coincidenza degli effetti misurati durante i due diversi tipi di prove.

[39] *La qualità tecnologica dei componenti edilizi. La durabilità*, AA. VV. a cura di P.N. Maggi, Epitesto, Milano, 2000. Si veda anche *La valutazione della durabilità. Risultati della prima fase sperimentale*, AA. VV. a cura di P.N. Maggi, Epitesto, Milano, 2001.

- La seconda scelta è stata quella di suddividere il programma in due momenti temporali ben diversi; uno caratterizzato da uno studio sul pacchetto esterno della soluzione tecnica, rappresentativo degli strati che più direttamente subiscono l'influenza degli agenti esterni (rivestimento protettivo, intonaco esterno e mattoni semipieni), mentre l'altro caratterizzato da uno studio sull'intera soluzione tecnica, che dovrebbe migliorare i risultati ottenibili, essendo in grado di simulare anche i meccanismi e i gradienti riscontrabili nella realtà.

7.3 L'attività di laboratorio

Nel novembre del 1996 il programma sperimentale ha avuto inizio grazie alla collaborazione del BEST (ex-DISET) con la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana di Lugano (SUPSI), attraverso la quale è stato possibile condurre le prove di invecchiamento accelerato all'interno della cella climatica CLIMATRON.
Definita l'attrezzatura da utilizzare ed il laboratorio di riferimento, si è passati (nel febbraio del 1977) alla fase di ricerca normativa e bibliografica sulle possibili tecniche in uso per l'esecuzione di prove accelerate di laboratorio, raccogliendo i dati in schede tecniche standard per l'interpretazione delle varie possibilità già presenti.
Un mese più tardi (marzo 1997) è avvenuta la catalogazione di tutti gli agenti possibili riscontrabili in natura e la verifica di quelli simulabili nella cella climatica, da cui scegliere i più significativi per la definizione del ciclo di prova accelerato.
La fase successiva, estremamente delicata per la buona riuscita dei test di invecchiamento accelerato, è stata la calibrazione di tale ciclo; gli agenti chiamati in causa artificialmente dal CLIMATRON, infatti, dovevano essere tali da riprodurre sollecitazioni che, per tipologia, per intensità e per estensione della loro zona di influenza, fossero rapportabili alle sollecitazioni alle quali la soluzione tecnica oggetto di indagine è esposta nel corso della sua vita di esercizio.
I risultati delle prove di calibrazione hanno alfine consentito di definire un ciclo di invecchiamento artificiale accelerato cui sottoporre i campioni di prova. Sempre molto brevemente, viene descritto il ciclo di invecchiamento, la cui durata complessiva è pari a 6 ore e 25 minuti. La struttura è la seguente:

- **Fase di pioggia**: in questa fase, della durata di 60 minuti, i campioni di prova vengono spruzzati in modo omogeneo con acqua alla temperatura di circa 20 °C. L'aria all'interno della cella climatica è mantenuta ad una temperatura costante di 20 °C e ad un'umidità relativa superiore al 95%;
- **Fase di gelo**: la temperatura dell'aria all'interno del vano in cui si trovano i campioni di prova bagnati viene raffreddata velocemente a –20 °C e successivamente mantenuta costante per una durata di 90 minuti;
- **Fase di clima caldo umido**: durante questa fase la temperatura e l'umidità dell'aria sono mantenute costanti, rispettivamente, a 55 °C e al 95% per una durata di 60 minuti. Questa fase è preceduta da un periodo di transizione della durata di circa 80 minuti;
- **Fase di clima caldo secco con irraggiamento**: durante 80 minuti i campioni di prova sono irraggiati mediante una lampada allo xeno. In questo periodo, il clima all'interno del vano di prova è caratterizzato da una temperatura di 30 °C e da un'umidità relativa del 40%.

Le fasi di calibrazione e di definizione del ciclo si sono protratte per 5 mesi, dall'ottobre 1997 fino al febbraio 1998. In parallelo alla definizione del ciclo sono state definite le prove di caratterizzazione da svolgere al tempo zero e durante l'esecuzione delle prove accelerate, individuando prove di due tipi: non distruttive (aspetto superficiale e rilevamento del peso, da eseguire ogni settimana su provini) e distruttive (compressione, adesione/trazione, porosità, assorbimento d'acqua, diffusione del vapore d'acqua e analisi della microstruttura, da svolgere periodicamente con frequenza diversa a seconda del differente dosaggio di resina dei provini).
I test sono stati condotti su provini protetti e non protetti per meglio valutare gli scostamenti dei differenti tipi di pittura; in fase di confezionamento, infatti, sono stati utilizzati rivestimenti protettivi differenti per quel che riguarda il tipo di resina ed il rapporto (in volume) di CVP[40], il cui valore è riferito alla percentuale di polveri contenuta nello strato solido.
Il periodo che va dal giugno all'ottobre 1998 viene dedicato al confezionamento dei provini non protetti, alla loro maturazione (in ambiente controllato) e all'esecuzione delle prove di cui sopra. I mesi successivi (ottobre 1998 – giugno 1999) sono serviti per lo stesso iter sperimentale, questa volta relativamente ai provini protetti.

7.4 I contributi forniti dall'esposizione in esterno

Quanto esposto nelle pagine precedenti rappresenta un quadro sintetico dell'attività di sperimentazione in condizioni controllate di laboratorio, parte di un programma sperimentale più ampio che richiede (come già visto) da un lato lo sviluppo di test di invecchiamento accelerato, mentre dall'altro prove condotte in esterno al fine di verificare la possibilità di un successivo re-scaling temporale.
Poiché l'attività del candidato in questi anni si è focalizzata fondamentalmente su questa parte del programma di ricerca, la trattazione dei principali risultati conseguiti verrà sviluppata più nel dettaglio.
Vediamo innanzitutto quali sono le variabili fondamentali che caratterizzano i differenti provini soggetti a prove di invecchiamento a lungo termine:

7.4.1 Differente tipo di rivestimento protettivo (pitture acriliche e pitture vinilversatiche)

Come nel caso dei test di laboratorio, sono stati confezionati provini rivestiti superficialmente con pitture acriliche e vinilversatiche. Questo per raccogliere informazioni in merito al grado di protezione all'acqua nel tempo, requisito fondamentale per la durabilità del componente.

7.4.2 Differente grado di protezione (CVP 40, CVP 60)

Anche in questo caso, come per i test di laboratorio, sono stati realizzati rivestimenti protettivi con differente rapporto (in volume) di polveri all'interno della pittura. Il CVP, per sua stessa definizione, misura la percentuale di polveri presente nello strato protettivo, cosicché la quantità di resina (in percentuale) è data dal complemento a 100 del valore del CVP. Questa scelta ha consentito di apprezzare meglio il contributo delle resine durante la fase di protezione della muratura. I provini sono stati confezionati (sia nel caso di pittura acriliche che in quello di pitture vinilversatiche) con una concentrazione volumetrica delle polveri pari a CVP40 e CVP60.

[40] CVP – Concentrazione Volumetrica Polveri

7.4.3 Doppia esposizione (Milano – I, Lugano – CH)

I provini realizzati per le prove in esterno sono stati esposti sia a Milano che a Lugano, ambienti con condizioni climatiche simili ma con livelli d'inquinamento diversi, in particolare per quel che riguarda l'aria e la pioggia. Dal momento che la presenza di particelle inquinanti non è stata presa in considerazione nell'inviluppo degli agenti operanti all'interno della cella climatica, questo parametro ci consentirà di trarre indicazioni circa la possibilità o meno di potere effettivamente trascurare questo aspetto per future attività di valutazione di vita utile su provini invecchiati artificialmente.

7.4.4 Differente inclinazione (45°, 90°)

Come ultima variabile è stata considerata l'inclinazione. I provini sono stati esposti in configurazione di 90° e di 45°; quest'ultima dovrebbe amplificare il degrado e rendere dunque più chiari gli effetti nel tempo sulla muratura. In accordo con alcuni standard, l'esposizione a 45 gradi dovrebbe accelerare l'invecchiamento esterno di un fattore ben preciso, da ricavare in seguito all'elaborazione dei risultati dell'invecchiamento.

Riassumendo quanto detto, per ogni sito di esposizione (Milano e Lugano) il monitoraggio ha riguardato otto differenti tipi di provini, caratterizzati dal loro acronimo inglese:

- **AH90** = **A**crylic paint with **H**igh resin ratio (CVP40) on **90**-degrees sample
- **AL90** = **A**crylic paint with **L**ow resin ratio (CVP60) on **90**-degrees sample
- **VH90** = **V**inylversatic paint with **H**igh resin ratio (CVP40) on **90**-degrees sample
- **VL90** = **V**inylversatic paint with **L**ow resin ratio (CVP60) on **90**-degrees sample
- **AH45** = **A**crylic paint with **H**igh resin ratio (CVP40) on **45**-degrees sample
- **AL45** = **A**crylic paint with **L**ow resin ratio (CVP60) on **45**-degrees sample
- **VH45** = **V**inylversatic paint with **H**igh resin ratio (CVP40) on **45**-degrees sample
- **VL45** = **V**inylversatic paint with **L**ow resin ratio (CVP60) on **45**-degrees sample

La **figura 7.1** mostra una "foto di gruppo" dei provini nel sito di esposizione in Milano:

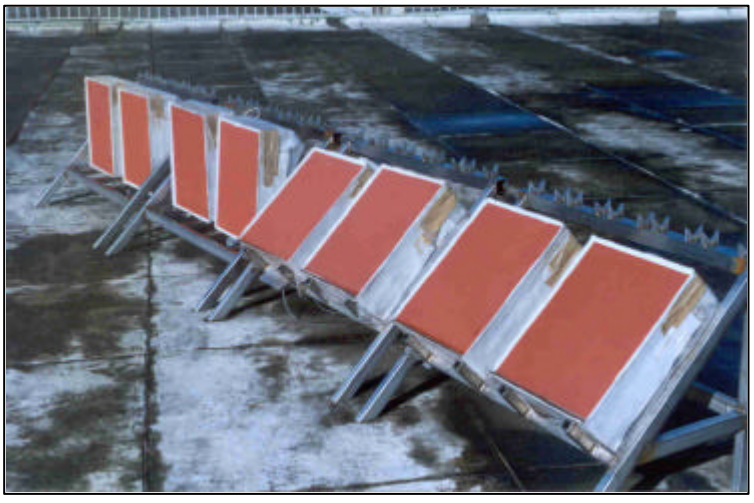

Fig. 7.1 – Milano: prove di invecchiamento naturale in esterno

7.5 Incremento di massa

Il monitoraggio, cominciato nel luglio del 1999 e tuttora in corso, ha mostrato una netta differenza nel comportamento tra provini a 45° e 90° solamente nel primo periodo di vita.
Le **figure 7.2 e 7.3** riportano uno stralcio dei dati ricavati sperimentalmente, che va dall'inizio dell'esperienza fino al marzo 2003; si può notare dalle stesse come, a fronte del primo periodo piovoso (07/99 – 12/99) si palesi una notevole differenza tra la famiglia di provini a 45° e quella di provini a 90° [Daniotti e Iacono 2003].

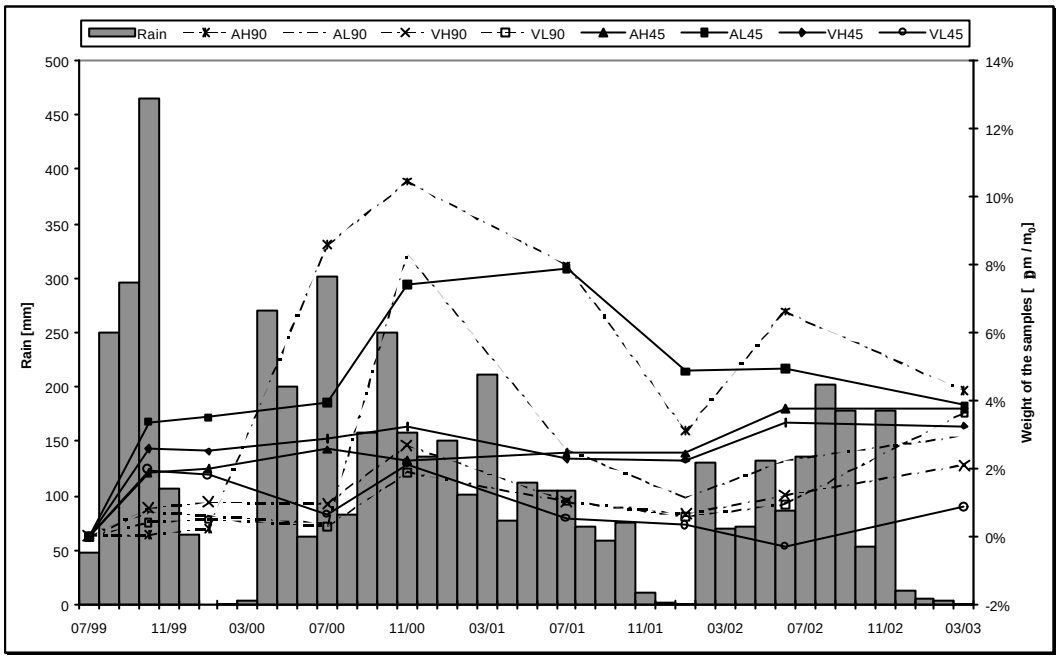

Fig. 7.2 – Correlazione peso-pioggia (Lugano, CH)

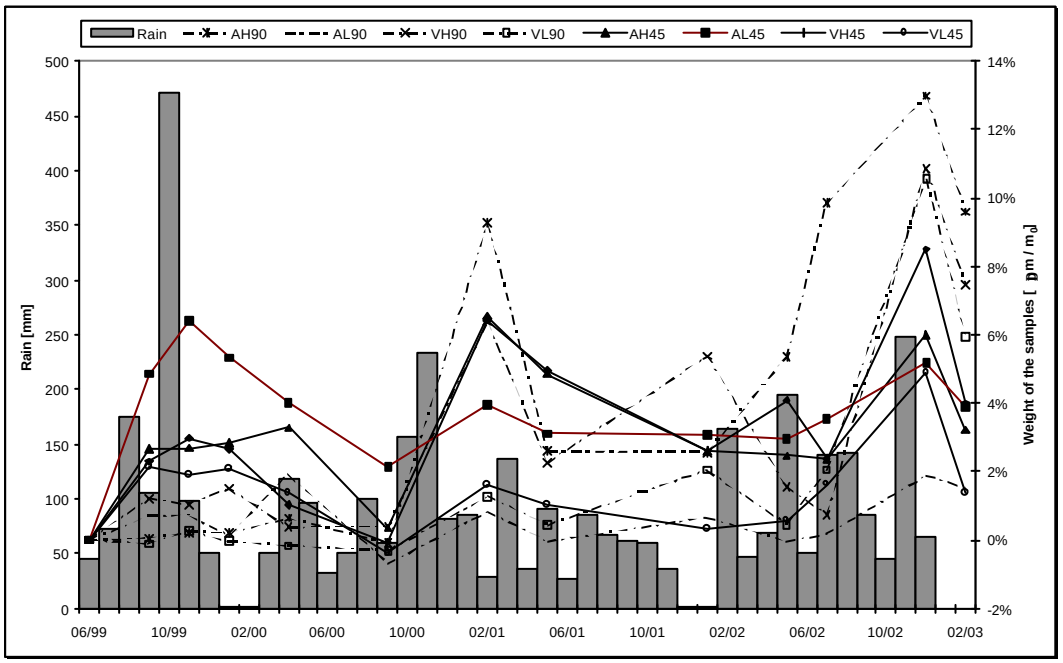

Fig. 7.3 – Correlazione peso-pioggia (Milano, I)

Il picco di tale periodo viene raggiunto in ottobre sia a Milano che a Lugano, con circa 470 mm di pioggia caduti durante l'intero mese.
Durante questo periodo i provini a 90° reagiscono bene, ovvero con un lieve incremento di massa dovuto alla differenza tra la quantità di acqua assorbita e quella successivamente restituita all'ambiente. Al contrario, i provini inclinati a 45° sembrerebbero molto più sollecitati dalla condizione sfavorevole determinata dalla loro inclinazione.
Questa differenza di comportamento tuttavia è destinata ad attenuarsi nel tempo fino ad esaurirsi completamente, se è vero che già nell'osservazione del marzo 2003 tra i peggiori provini ne troviamo due su quattro a Lugano (e addirittura tre su quattro a Milano) a 90°. La spiegazione di questo fenomeno potrebbe essere la seguente: inizialmente, quand'è presente un grande assorbimento d'acqua (in accordo con i risultati di laboratorio), i provini a 45 gradi sono fortemente stressati. Più tardi, la resistenza alla diffusione al vapore aumenta, in funzione del numero di cicli. Come conseguenza di ciò, la differente inclinazione dei provini nel tempo diventa un parametro sempre meno importante nel soddisfacimento delle funzioni protettive da parte delle pitture.

7.6 Fotografie superficiali

Durante l'esposizione in esterno, il degrado superficiale è stato monitorato attraverso delle fotografie. Questo ci ha consentito di ottenere informazioni sui differenti meccanismi di degrado che caratterizzano gli stati protettivi (§ 7.6.1). Inoltre, è stato anche analizzata l'evoluzione del degrado confrontando i danni visibili nel tempo (§ 7.6.2). Come ci si aspettava, il degrado maggiore è stato individuato su provini a 45°.
Le figure seguenti mostreranno il processo di invecchiamento naturale per quel che riguarda le pitture considerate.

7.6.1 Meccanismi di degrado

- **AH – Pitture acriliche ad alto contenuto di resine**

Le pitture acriliche hanno evidenziato in assoluto la più elevata resistenza gli agenti sollecitanti.

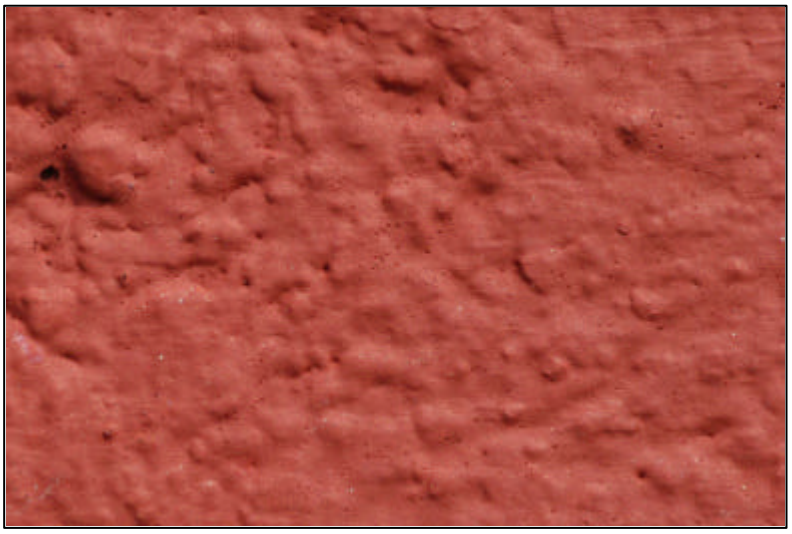

Fig. 7.4 – Provino rivestito con pittura acrilica (AH90) – Milano, 9 aprile 2003

La **figura 7.4** mostra come film protettivo su un provino AH90 sia ancora regolarmente distribuita e priva di bolle dopo quasi quattro anni di esposizione naturale in esterno.
Il campione protetto con pittura acrilica mostra una superficie praticamente integra; non si osservano infatti nè bolle né cavillature. Sulla superficie sono visibili unicamente minuscole cavità, la cui presenza è da attribuire verosimilmente alla distruzione della pellicola superficiale delle bolle d'aria introdotte nella pittura durante la sua applicazione.

- **AL – Pitture acriliche a basso contenuto di resine**

Una maggiore quantità di polvere rende il film protettivo più soggetto a fessurazioni (cfr. **figura 7.5**); ciò nonostante questi fenomeni appaiono ancora come localizzati, mentre il resto del film appare privo di visibili i danni, in accordo con i risultati di laboratorio dopo un alto numero di cicli.

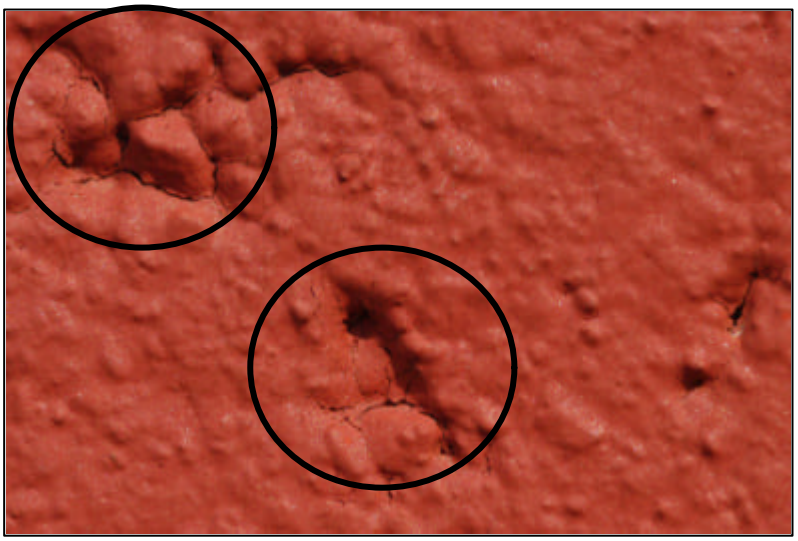

Fig. 7.5 – Provino rivestito con pittura acrilica (AL90) – Milano, 9 aprile 2003

- **VH – Pitture viniliche ad alto contenuto di resine**

Il meccanismo di degrado delle pitture vinilversatiche appare completamente differente. La **figura 7.6** mostra lo strato di protezione in un provino rivestito con resine viniliche a basso contenuto di polveri; la superficie è caratterizzata dalla presenza di bolle, alcune delle quali lacerate. La continuità del film, tuttavia, al di là di aperture localizzate in corrispondenza delle bolle, appare ancora ininterrotta.

- **VL – Pitture viniliche a basso contenuto di resine**

La **figura 7.7** mostra infine il meccanismo di degrado di provini rivestiti con pitture viniliche a basso contenuto di resine. In questo caso una fitta rete di microcavillature appare regolarmente distribuita lungo l'intera superficie, costellata al contempo da un'elevata presenza di bolle.

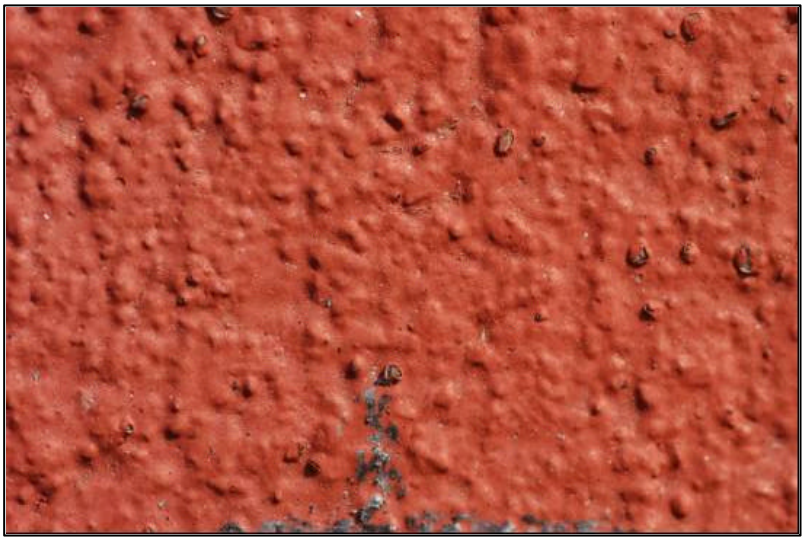

Fig. 7.6 – Provino rivestito con pittura vinilica (VH90) – Milano, 9 aprile 2003

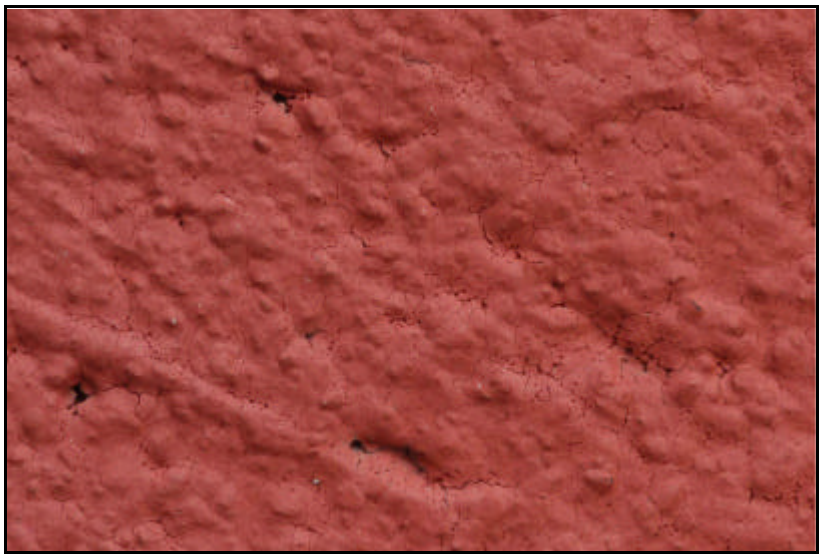

Fig. 7.7 – Provino rivestito con pittura vinilica (VL90) – Milano, 9 aprile 2003

Le esposizioni nei due siti geografici (Milano e Lugano) è servita a validare questo differente modello di comportamento delle pitture; peraltro, le stesse prove di invecchiamento accelerato avevano previsto questi differenti meccanismi di degrado, come si può vedere dalle **figure 7.8 e 7.9**.
I degradi più evidenti sono stati riscontrati in provini rivestiti con pitture vinilversatiche, mentre i film acrilici hanno mostrato di resistere abbastanza bene ai carichi ambientali, anche nella configurazione a 45°.

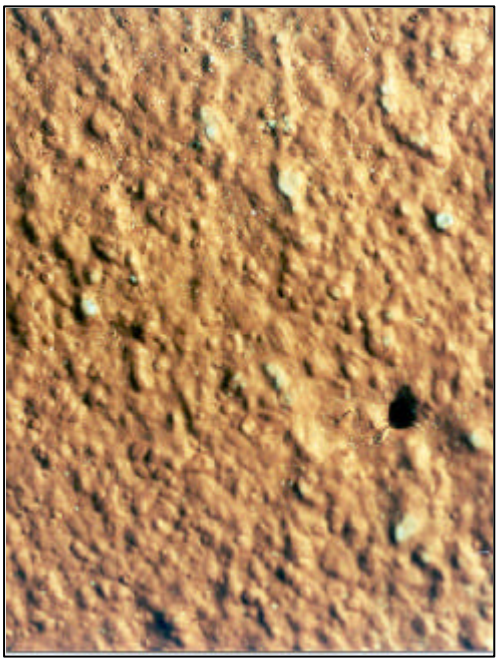

Fig. 7.8 – Provino VH (150 cicli)

Fig. 7.9 – Provino VL (150 cicli)

I risultati di quanto mostrato fino ad ora possono essere riassunti nella seguente **tabella 7.10** [Daniotti e Iacono 2005].

MECCANISMI DI DEGRADO			
PITTURE ACRILICHE		**PITTURE VINILVERSATICHE**	
AH (CVP40)	**AL (CVP60)**	**VH (CVP40)**	**VL (CVP60)**
Leggera presenza di bolle	Fessure localizzate	Presenza di bolle lacerate	Fitta rete di microcavillature

Tab. 7.10 – Rivestimenti protettivi utilizzati e meccanismi di degrado

7.6.2 Evoluzione del degrado

Il continuo monitoraggio ha consentito di seguire da vicino anche le evoluzioni dei degradi dei provini nel tempo. Indicazioni del genere sono risultate preziose per due ordini di motivi: in primo luogo questo ha permesso di valutare la rapidità con la quale i rivestimenti protettivi si deteriorano, fornendo indicazioni circa la loro sensibilità alle sollecitazioni indotte dal carico ambientale; contestualmente, il confronto tra provini esposti ad inclinazioni diverse ha reso possibile stimare l'ordine di grandezza del fattore di conversione tra prove di invecchiamento naturali (inclinazione a 90°) e prove di invecchiamento semi-accelerate (inclinazione a 45°), in grado di fornire in tempi più rapidi dati sulla fine di vita utile.
L'evoluzione dei fenomeni di degrado può essere seguita attraverso le **figure 7.11 e 7.12**; si noti che le fotografie appartengono a provini esposti ad inclinazione verticale. I tempi registrati pertanto si riferiscono alla reale configurazione di esercizio, corrispondente a meno di quattro anni di esposizione naturale (essendo il monitoraggio cominciato nel luglio 1999).

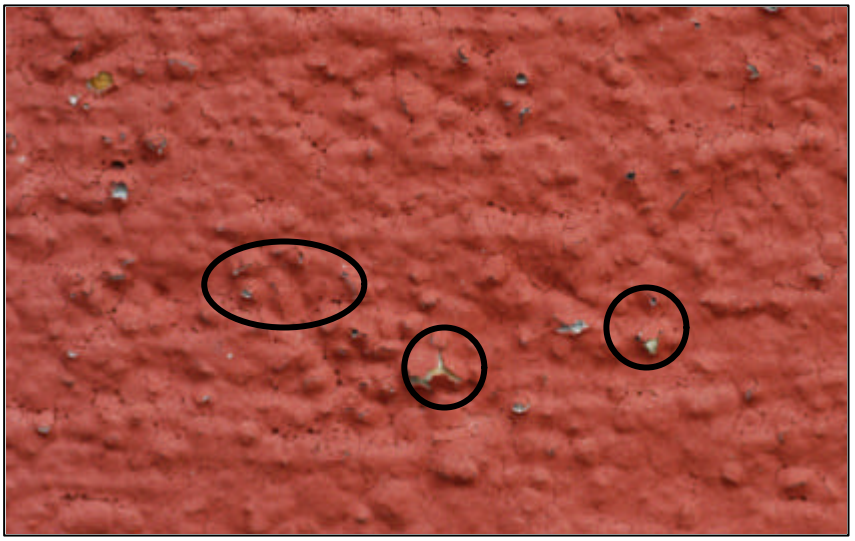

Fig. 7.11 – Provino rivestito con pittura vinilica (VL90), Milano, 9 aprile 2003

Rispetto alla situazione dell'aprile 2003, ad un anno di distanza il processo di blistering risulta ad uno stadio più avanzato; altrettanto marcati si rivelano i fenomeni di distaccamento superficiale della pellicola protettiva, che mette a nudo consistenti zone del sottostante intonaco.
Si noti anche il meccanismo di degrado costituito dalla fitta rete di microcavillature distribuite sull'intera superficie del provino e tipico delle pitture vinilversatiche a basso contenuto di resine.

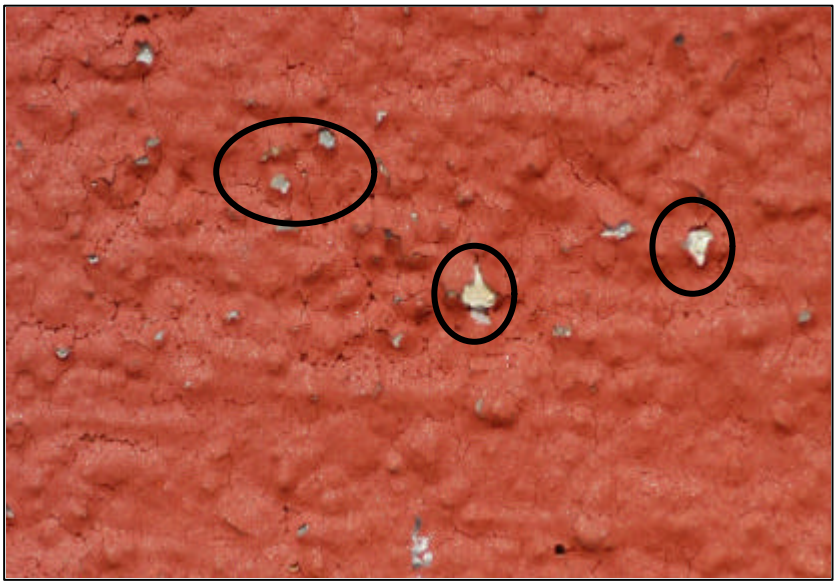

Fig. 7.12 – Provino rivestito con pittura vinilica (VL90), Milano, 29 marzo 2004

7.7 Re-scaling

L'esame in laboratorio delle lamine sottili, attraverso il microscopio ottico, ci ha infine consentito di correlare il crescente livello di degrado dei provini soggetti ad esposizione esterna con quello dei provini invecchiati artificialmente in condizioni controllate.
Le analisi sono state condotte dopo 0, 75, 150 e 350 cicli; grazie a questo tipo di prova è stato possibile osservare l'evoluzione del degrado sulla superficie dell'intonaco esterno (al crescere del numero di cicli) su provini rivestiti con resine vinilversatiche ad alta concentrazione di polveri. In accordo con i risultati raccolti dalle osservazioni visive, dopo 75 cicli cominciano a manifestarsi bolle e rigonfiamenti (cfr. **figura 7.13**).

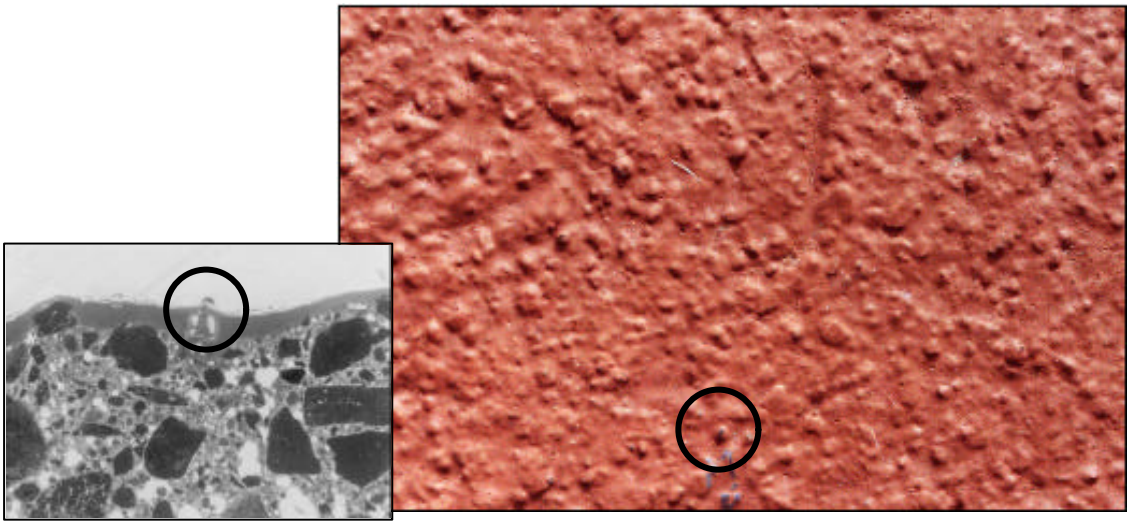

Fig. 7.13 – Confronto tra provini VH a 75 cicli e VH45 dopo 2 anni di esposizione (giugno 1999 – maggio 2001): comincia il fenomeno di blistering

Dopo 150 cicli (cfr. **figura 7.14**) il fenomeno si traduce in distaccamenti e rotture della pittura, che evidentemente in questa condizione perde la sua funzione di protezione e tenuta all'acqua.

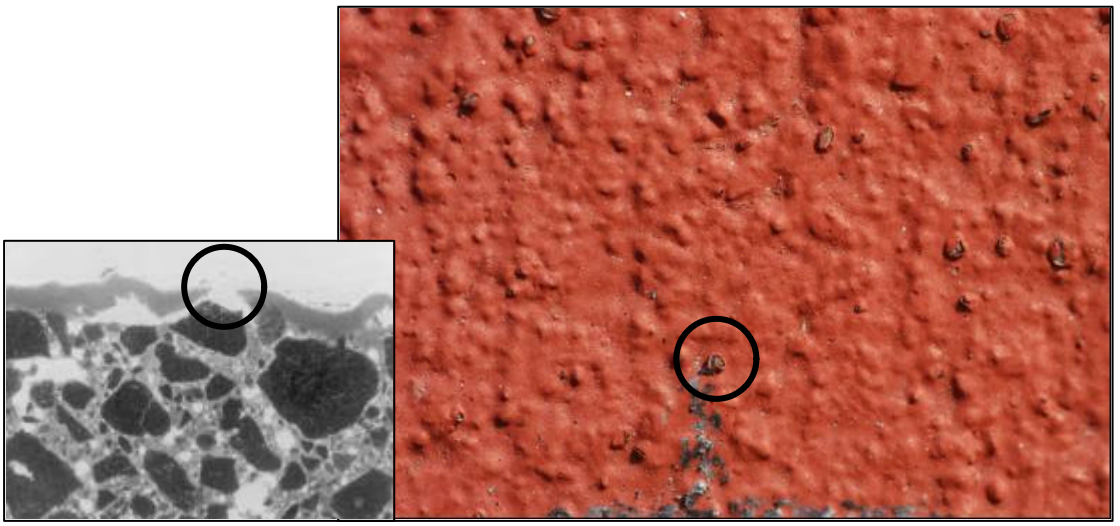

Fig. 7.14 – Confronto tra provini VH a 150 cicli e VH45 dopo 4 anni di esposizione (giugno 1999 – aprile 2003): sono visibili rotture e distaccamenti del rivestimento

7.8 Valutazione della vita utile

Successivamente all'attività di re-scaling, fondamentale per creare una corrispondenza tra i cicli di invecchiamento accelerato e l'esposizione in esterno, è stata tentata una valutazione della vita utile dei provini esposti nelle due città. Stabilire la fine di vita utile significa capire se il film protettivo sia ancora in grado o meno di soddisfare il requisito per il quale è stato progettato e realizzato; dal momento che il contributo fondamentale di tale elemento si sostanzia nella tenuta all'acqua, sono stati condotti test distruttivi per evidenziare il grado di soddisfacimento di tale requisito.
L'istogramma di **figura 7.15** mostra i risultati relativi al coefficiente di assorbimento d'acqua per provini esposti a Lugano nella configurazione a 45° [Bazzi 2004].
Inizialmente i test sono stati condotti sui provini originali; in un secondo momento le stesse prove sono state ripetute (sugli stessi provini) una volta rimosso lo strato di rivestimento superficiale, necessario ad evitare l'ingresso di acqua all'interno della soluzione tecnica.
Come si può notare, i provini rivestiti con pitture acriliche mostrano un comportamento chiaramente peggiore in termini di tenuta all'acqua rispetto alla condizione precedente; questo significa che il loro compito di protezione è ancora svolto in maniera significante dalla pelle esterna.
Al contrario, nel caso di provini rivestiti con pitture vinilversatiche, il passaggio dalla prima situazione alla seconda non comporta cambiamenti di alcun tipo, palesando il contributo nullo della protezione il cui degrado evidentemente ha raggiunto un livello tale da impedirle di svolgere correttamente la sua funzione principale.
Si può dunque concludere che in questo caso la fine di vita utile della pittura è stata raggiunta e che dunque, in reali condizioni di esercizio, si dovrebbe procedere con un intervento atto a ripristinare il corretto funzionamento del rivestimento.

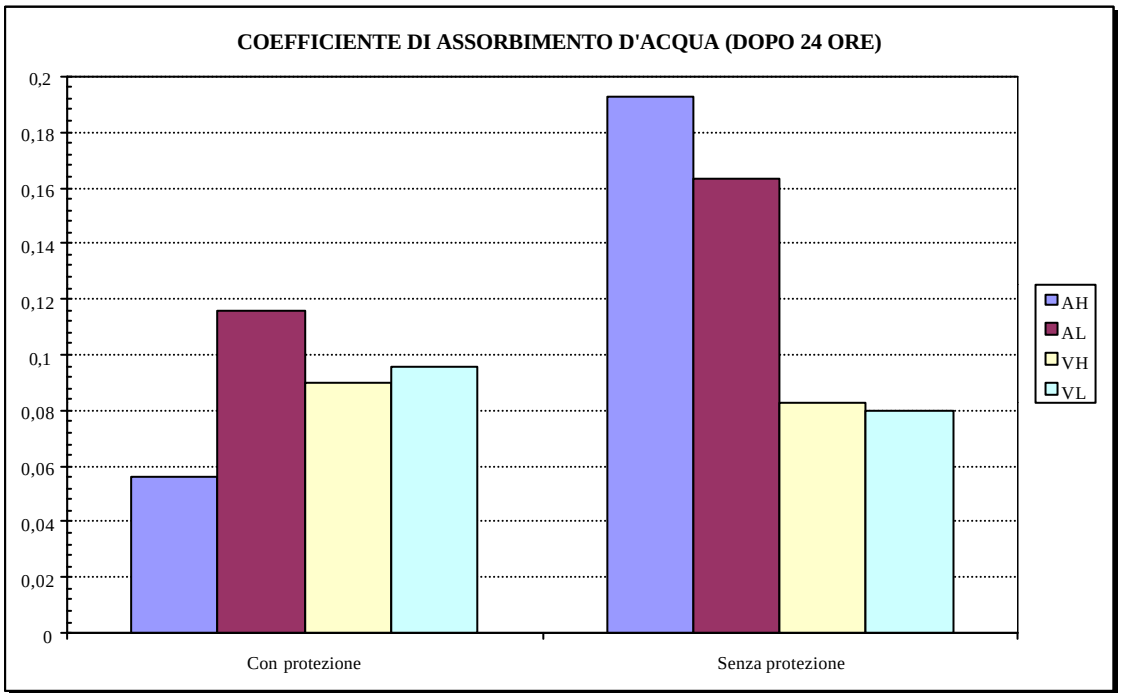

Fig. 7.15 – Coefficienti di assorbimento d'acqua per provini esposti a 45°

Gli stessi risultati possono essere rappresentati in relativo (**figura 7.16**), mettendo in evidenza esclusivamente gli scostamenti percentuali (per ogni tipo di pittura) tra la condizione iniziale (provini con intonaco esterno) e quella finale (provini senza intonaco esterno).

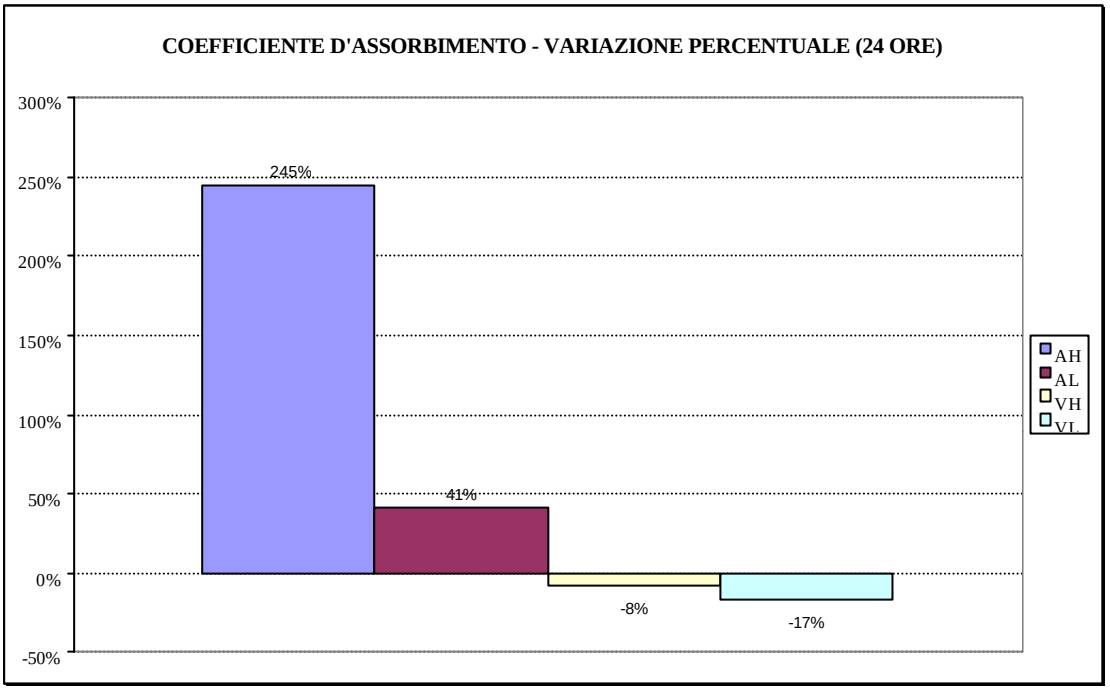

Fig. 7.16 – Coefficiente di assorbimento: scostamento percentuale

Lo scostamento è riportato come variazione rispetto al valore iniziale, ovvero:

$$\frac{\Delta x}{x_p} = \frac{x_{np} - x_p}{x_p}$$

dove:

- x_{np} = Valore del coefficiente di assorbimento del provino non protetto;
- x_p = Valore del coefficiente di assorbimento del provino protetto.

Da osservare come gli scostamenti negativi relativi ai provini rivestiti con pitture vinilversatiche rientrino nelle normali tolleranze imputabili alle misurazioni durante la prova non potendosi verificare, evidentemente, la condizione per la quale il grado di protezione all'acqua (pressoché totale all'inizio della sperimentazione) aumenti nel tempo.

7.9 Conclusioni

Il lavoro condotto nel corso di questi anni all'interno del Dipartimento BEST, in collaborazione con la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), ha consentito al gruppo di ricerca di pervenire ad alcuni importanti risultati, che verranno brevemente riassunti nel presente paragrafo.

- E' stato possibile identificare i meccanismi di degrado, relativi a provini confezionati con differenti tipi di rivestimenti protettivi; è stato inoltre osservato come anche la semplice variazione del contenuto di resine possa portare a differenti meccanismi di degrado per pitture dello stesso tipo, nel senso che a maggiori quantità di resine corrisponde un migliore grado di protezione; da questo punto di vista, i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio validano quelli ricavati dalle esposizioni in esterno. Per maggiore comodità del lettore viene qui riproposta la tabella che ne riassume le possibili fenomeniche di degrado:

MECCANISMI DI DEGRADO			
PITTURE ACRILICHE		**PITTURE VINILVERSATICHE**	
AH (CVP40)	**AL (CVP60)**	**VH (CVP40)**	**VL (CVP60)**
Leggera presenza di bolle	Fessure localizzate	Presenza di bolle lacerate	Fitta rete di microcavillature

- Per quel che riguarda il grado di protezione delle pitture utilizzate, le acriliche hanno mostrato un migliore grado di tenuta all'acqua rispetto alle vinilversatiche, che nella configurazione a 45° mostrano una vita utile non superiore a 4 anni, dato ricavato da test distruttivi tesi a ricavare il coefficiente di assorbimento d'acqua del film protettivo.

- Il monitoraggio sull'evoluzione dei degradi ha fornito indicazioni sul fattore di amplificazione dei degradi nel passaggio da prove di invecchiamento naturale (provini a 90°) a prove di invecchiamento semi-accelerate (provini a 45°); il fattore 6 ÷ 8 proposto da altri studi sembra poco verosimile; molto più probabili invece correzioni con fattori prossimi a 2 ÷ 3.

- Letture in parallelo di analisi microfotografiche e visive hanno infine consentito di stabilire una corrispondenza tra il numero di cicli di laboratorio ed il numero di anni d'invecchiamento in esterno (re-scaling temporale). In particolare, per provini esposti a 45° e rivestiti con pitture vinilversatiche ad alta concentrazione di resine, si è stabilito che:
  - 2 anni d'invecchiamento semi-accelerato corrispondono a 75 cicli di laboratorio;
  - 4 anni d'invecchiamento semi-accelerato corrispondono a 150 cicli di laboratorio.

- Gli ultimi due punti consentono di estrapolare i risultati a provini VH90, che dovrebbero possedere un periodo di vita utile di circa 8 ÷ 12 anni.

7.10 Sviluppi futuri della ricerca

La ricerca, che proprio in questo periodo è entrata nel suo nono anno di attività, non è certo finita. Il lavoro procederà contemporaneamente su due filoni; da un lato per completare la prima fase del programma (ovvero quella relativa al pacchetto esterno della soluzione tecnica), mentre dall'altro per recuperare informazioni sul pacchetto completo (test "allo sportello").

- Sul fronte delle esposizioni in esterno dei pacchetti parziali, difatti, sarà interessante confermare il re-scaling temporale anche sui provini VL45, AH90 e AH45. Chiaramente, i tempi di risposta saranno più lunghi perché, com'è stato già evidenziato nel corso della trattazione, le pitture acriliche hanno mostrato un grado di resistenza alle sollecitazioni esterne decisamente superiore ai rivestimenti vinilversatici. Tale lavoro consentirà anche di validare l'ipotesi fatta sul fattore di amplicazione dei degradi, attraverso un prolungamento dell'esposizione in esterno sui provini a 90°.
  Andranno inoltre completate le prove distruttive sui provini di Lugano che già hanno consentito di ottenere le informazioni necessarie alla determinazione della vita utile; tali prove riguarderanno, tra le altre, la valutazione della resistenza a trazione (per valutare il grado di adesione tra intonaco e laterizio), della resistenza a compressione, della porosità ed una serie di analisi microstrutturali attraverso fotografie al microscopio ottico, che consentiranno di mettere in evidenza le trasformazioni che intervengono sia sulla superficie che all'interno della struttura all'aumentare dell'esposizione.
- Per quanto riguarda la sperimentazione sull'intera soluzione, particolarmente interessante per la possibilità di simulare i periodi di transitorio con i relativi gradienti e quindi gli effetti riscontrabili nella realtà quotidiana, le prove andranno condotte in due configurazioni; costruendo un laboratorio tipo-tecnologico in grado di riprodurre condizioni interne controllate ed attraverso il rilievo di edifici reali nuovi, la cui fase esecutiva è già stata avviata.
  L'introduzione di sensori in grado di rilevare in continuo (e in più punti) le condizioni termoigrometriche delle chiusure permetteranno una lettura dei degradi di estremo interesse per i discorsi di soddisfacimento prestazionale già visti più di una volta nei capitoli precedenti, e che serviranno come dati di input per varie metodologie previsionali di vita utile[41].

Al termine di questa fase sarà possibile chiudere la sperimentazione disponendo di dati provenienti da prove in esterno e da prove di laboratorio condotte sia su provini parziali che su interi pacchetti tecnologici, e che consentiranno di trarre indicazioni circa gli aspetti precedentemente individuati. Quest'ultima fase della sperimentazione, che si concluderà nel novembre 2005, riguarderà anche studi su nuove soluzioni tecniche nel laboratorio (appena acquisito) di Milano. La scelta è ricaduta sulla tecnologia edilizia "a cappotto", sempre più utilizzata nella pratica quotidiana ma che tuttavia presenta ancora evidenti problematiche di corretto funzionamento, legate alla criticità dello strato di finitura esterno, cui sono attribuiti numerosi e delicati compiti prestazionali.

[41] Si vedano più avanti PLM, cap. 9 e FMECA, cap. 10. Le curve di decadimento rientrano nel metodo FMECA all'interno di un'analisi quantitativa volta ad individuare i tempi necessari per passare da uno stato di guasto ad un altro, all'interno di uno scenario dei degradi. Questa parte del metodo, tuttavia (per altro ancora *in fieri* all'interno del CSTB), non è stata approfondita nel corso della presente trattazione.

Inoltre è già stato avviato (sotto cofinanziamento MIUR[42]) un programma pluriennale di ricerca interuniversitaria a livello nazionale, con l'ambizione di estendere la metodologia e i risultati ottenuti ad altre importanti classi di elementi tecnici.
In particolare, l'Università degli Studi di Brescia lavorerà sulla classe di pareti perimetrali verticali portanti e il Politecnico di Torino sugli infissi esterni verticali; le chiusure orizzontali saranno trattate dall'Università degli Studi di Napoli "Federico II°" (coperture continue) e dall'Università degli Studi di Palermo (coperture discontinue), mentre il contributo dell'Università degli studi di Catania riguarderà soluzioni costruttive tipiche dell'area circumetnea e (più in generale) di tutte quelle zone che adottano materiali lavici sul territorio siciliano. Questo programma consentirà tra l'altro di estendere i siti di esposizione per ogni tipo di provino all'intero territorio nazionale, fornendo importanti dati di input per il progettista durante la fase di contestualizzazione dell'intervento, dove il differente carico ambientale potrebbe influenzare sensibilmente la previsione di durata.

[42] MIUR – Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca

Cap. 8 – Evoluzione del Metodo Fattoriale

8.1 L'esigenza di un Metodo Fattoriale più oggettivo

Il programma sperimentale illustrato nel capitolo precedente, ricalcando per molti versi la metodologia proposta dall'ISO TC59 / SC14 all'interno dello standard ISO 15686, ha fornito (e soprattutto continuerà a fornire) indicazioni circa la durabilità dei componenti edilizi indagati; l'elaborazione dei dati ottenuti sperimentalmente porterà alla definizione di modelli di previsione (nel tempo) del comportamento reale delle soluzioni tecniche monitorate.
I risultati di vita utile ottenuti, peraltro, saranno utilizzabili solo in parte da chi volesse compiere previsioni di durata in futuro, giacché l'attività di sperimentazione ha riguardato componenti edilizi **fuori sistema** e in **condizioni standard di sollecitazione**. In altre parole, i risultati saranno fruibili in termini di **Reference Service Life**.
Sarà necessaria quella contestualizzazione dell'intervento edilizio che oggigiorno, a livello internazionale, è attribuita al Metodo Fattoriale. Attraverso di esso, una serie di fattori correttivi porteranno alla determinazione della **Estimated Service Life**, vita utile dell'oggetto edilizio intimamente legata alle condizioni d'uso dell'opera nella quale l'oggetto stesso opererà.
Come già rilevato nei capitoli precedenti, il Metodo Fattoriale sembra essere, ad oggi, lo strumento sul quale più si punta in ambito internazionale, data la sua enorme versatilità nella pratica quotidiana. Quest'affermazione, tuttavia, non deve farci dimenticare le insidie celate dietro uno strumento che solo apparentemente si presenta *alla portata di tutti*, ma che in realtà, per essere correttamente applicato, richiede una conoscenza degli aspetti durabilistici (e, cosa più ancora delicata, una sensibilità a tali problematiche) che spesso rischiano di allontanare l'utente finale dal metodo o (nella peggiore delle ipotesi) di portarlo a considerazioni fallaci nella corretta individuazione della vita utile di progetto degli elementi tecnici prescelti.
Va ricordato, infatti, come le critiche maggiori legate all'adozione di tale metodologia di correzione della Reference Service Life siano proprio legate all'alto grado di soggettività del Metodo Fattoriale; più persone possono ottenere risultati differenti pur partendo dagli stessi dati di input.

Ricordando la seguente formula che definisce il Metodo Fattoriale[43](cfr. cap. 4)

ESLC = RSLC * factor A * factor B * factor C * factor D * factor E * factor F * factor G **(1)**

si può notare come la vita utile stimata sia fortemente influenzata dal giudizio dell'utente.
Per esempio, alcune semplici considerazioni di Cusmano *et al.* [2003] mostrano come si possano ottenere scostamenti superiori all'80% nella stima della ESLC, a fronte di differenze numericamente piccole (addirittura minori del 10%) (**fig. 8.1**).

[43] ISO 15686-1, § 9 "Factor Method for estimating service life", pag. 22 e seguenti.

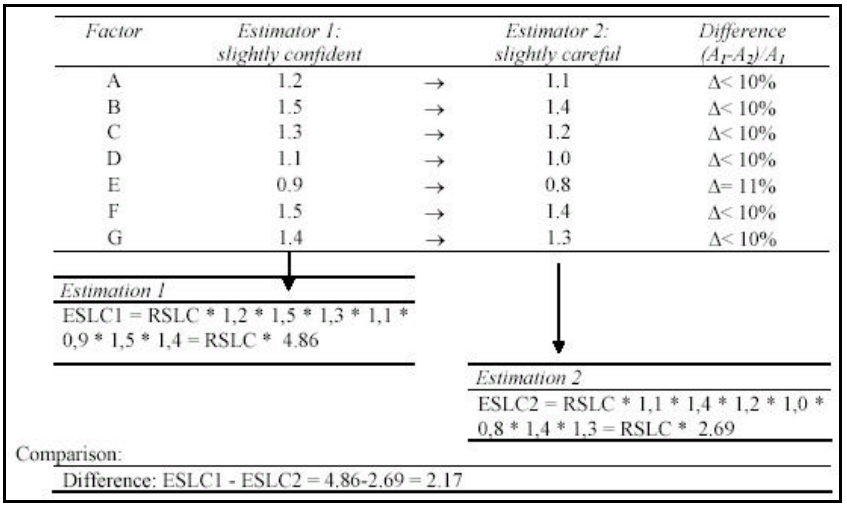
Factor
Estimator 1: slightly confident
Estimator 2: slightly careful
Difference $(A_1-A_2)/A_1$
A 1.2 → 1.1 Δ< 10%
B 1.5 → 1.4 Δ< 10%
C 1.3 → 1.2 Δ< 10%
D 1.1 → 1.0 Δ< 10%
E 0.9 → 0.8 Δ= 11%
F 1.5 → 1.4 Δ< 10%
G 1.4 → 1.3 Δ< 10%
Estimation 1
ESLC1 = RSLC * 1,2 * 1,5 * 1,3 * 1,1 * 0,9 * 1,5 * 1,4 = RSLC * 4.86
Estimation 2
ESLC2 = RSLC * 1,1 * 1,4 * 1,2 * 1,0 * 0,8 * 1,4 * 1,3 = RSLC * 2.69
Comparison:
Difference: ESLC1 - ESLC2 = 4.86-2.69 = 2.17

Fig. 8.1 – Esempio di attribuzione di valori condotta da parte di due diversi estimatori

Da qui, dunque, è nata l'esigenza di definire delle linee guida e degli strumenti progettuali che consentano all'utente del Metodo Fattoriale di essere accompagnato nel modo meno soggettivo possibile all'attribuzione dei valori relativi ai fattori modificanti.

8.2 Strumenti e linee guida per la valutazione del fattore A

Questa prima fase della ricerca è stata finalizzata alla definizione di strumenti per la valutazione del fattore A ("Qualità del componente"), risultato dell'analisi dettagliata di tutte le parti che costituiscono il componente edilizio.
La procedura sviluppata passa attraverso l'analisi funzionale degli elementi tecnici e dei componenti dell'opera, l'individuazione dei fattori in grado di influenzare la loro vita utile e il confronto con elementi di riferimento simili, le cui prestazioni sono note, con lo scopo di fornire una valutazione più oggettiva.
L'idea base della ricerca è quella di scomporre ogni fattore in sub-fattori e di creare griglie di valutazione utili all'utente nella stima dei valori. In tale modo la stima di un valore si articola in un processo suddiviso in due differenti fasi: costruzione ed uso delle griglie. Il primo passo, caratterizzato da alta soggettività, può essere fatto una volta per tutte (per differenti classi di componenti o materiali) da esperti o addirittura dai produttori stessi. Il secondo passo è invece lasciato all'utente, non essendo richiesta una competenza particolare nelle problematiche di predizione di vita utile. Chiaramente, le griglie devono basarsi su standard o su procedure progettuali ampiamente utilizzate. Di seguito verranno esposti i principali passaggi che costituiscono la procedura di stima della vita utile di un componente edilizio, utilizzando la proposta del metodo di valutazione per il fattore A.

8.2.1 Organizzazione razionale delle informazioni preliminari

Innanzi tutto, l'opera deve essere scomposta in sistemi e sub-sistemi attraverso un sistema di classificazione ad albero, per individuare in qualsiasi momento (ed in modo univoco) tutti gli elementi che costituiscono l'opera stessa. Un utile riferimento in questa fase può essere individuato nella norma UNI 8290[44], che divide l'opera in più livelli, per elementi omogenei.

[44] UNI 8290-1:1981 *Edilizia residenziale: Sistema tecnologico – Classificazione e terminologia*

All'interno della norma, compaiono tre livelli: classi di unità tecnologiche, unità tecnologiche e classi di elementi tecnici. L'esigenza di lavorare con componenti edilizi ci ha spinto ad aggiungere due ulteriori livelli: elementi tecnici e componenti edilizi.

8.2.2 Analisi agenti – azioni – effetti

Per ogni componente vengono individuati i possibili e plausibili guasti attraverso un'analisi agenti-azioni-effetti.
L'analisi consiste nell'individuazione di tutti i possibili agenti di degrado a cui il componente sarà probabilmente soggetto durante la sua vita utile, e nella successiva identificazione delle azioni che tali agenti svilupperanno; l'analisi si conclude con la definizione di tutti i possibili e plausibili guasti. Il riferimento da noi adottato per l'individuazione degli agenti è lo standard internazionale ISO 6241:1984[45], che classifica gli agenti di degrado in base alla loro differente natura (meccanica, elettromagnetica, chimica, termica e biologica) e alla loro origine (interna od esterna all'edificio).
La **tabella 8.2**, estratto dello standard, mostra un esempio di tale classificazione:
Gli agenti vengono individuati tra quelli che possono influire, modificandole, sulle caratteristiche del componente portando ad una caduta prestazionale tale da compromettere il soddisfacimento delle prestazioni programmate e fornite con intensità definita al momento della sua entrata in esercizio.
La successiva individuazione delle azioni sviluppate dagli agenti e degli effetti indotti permetterà di definire il panorama complessivo dei requisiti prestazionali che il componente sarà tenuto a possedere; tali caratteristiche dovrebbero rappresentare la trasposizione di particolari requisiti in parametri facilmente individuabili e misurabili.
Per maggiore chiarezza, viene di seguito riportata la principale terminologia adottata in ambito internazionale e definita dal gruppo CIB W086 "Building Pathology":

- **Agente**: entità che provoca un determinato effetto mediante la propria azione;
- **Azione**: mediatore fisico-chimico o meccanico capace di modificare l'ambiente, gli oggetti edilizi ed il loro comportamento;
- **Effetto**: modificazione dell'ambiente, degli oggetti edilizi e del loro comportamento conseguente ad una determinata azione;
- **Anomalia**: manifestazione inattesa percepibile visivamente o strumentalmente, più o meno evidente; può avere rilevanza sintomatica (esantema) o meno per l'individuazione del difetto; può essere lo stesso difetto e lo stesso guasto. L'indagine diagnostica ha il compito di stabilirne la rilevanza rispetto al degrado riscontrato;
- **Guasto**: deterioramento che rende inutilizzabile o non più rispondente alla sua funzione un elemento tecnico o una sua parte. Anche il guasto può derivare da una condizione patologica o da fatti connessi al normale invecchiamento: la discriminante tra le due condizioni è la temporizzazione dell'evento.

In ogni caso va sottolineato il fatto che un effetto è in grado di attivare, in tempi più o meno rapidi, un guasto solo se stimolato dallo specifico agente cui è sensibile: non è quindi detto che la presenza di un particolare agente (o di una combinazione di essi) costituisca condizione sufficiente per il manifestarsi di un'anomalia.

[45] ISO 6241:1984 *Performance standards in buildings – Principles for their preparation and factors to be considered*

Nature	Origin			
	External to the building		Internal to the building	
	Atmosphere	Ground	Occupancy	Design consequences
1 Mechanical agents				
1.1 Gravitation	Snow loads, rain water loads	Ground pressure, water pressure	Live loads	Dead loads
1.2 Forces and imposed or restrained deformations	Ice formation pressure, thermal and moisture expansion	Subsidence, slip	Handling forces, indentation	Shrinkage, creep, forces and imposed deformations
1.3 Kinetic energy	Wind, hail, external impacts, sand-storm	Earthquakes	Internal impacts, wear	Water hammer
1.4 Vibrations and noises	Wind, thunder, aeroplanes, explosions, traffic, machinery noises	Traffic and machinery vibrations	Noise and vibration from music, dancers, domestic appliances	Services noises and vibrations
2 Electro-magnetic agents				
2.1 Radiation	Solar radiation, radioactive radiation	Radioactive radiation	Lamps, radioactive radiation	Radiating surface
2.2 Electricity	Lightning	Stray currents	–	Static electricity, electrical supply
2.3 Magnetism	–	–	Magnetic fields	Magnetic fields
3 Thermal agents	Heat, frost, thermal shock	Ground heat, frost	User emitted heat, cigarette	Heating, fire
4 Chemical agents				
4.1 Water and solvents	Air humidity, condensations, precipitations	Surface water, ground water	Water sprays, condensation, detergents, alcohol	Water supply, waste water, seepage
4.2 Oxidizing agents	Oxygen, ozone, oxides of nitrogen	Positive electro-chemical potentials	Disinfectant, bleach	Positive electrochemical potentials
4.3 Reducing agents	–	Sulfides	Agents of combustion, ammonia	Agents of combustion, negative electrochemical potentials
4.4 Acids	Carbonic acid, bird droppings, sulfuric acid	Carbonic acid, humic acids	Vinegar, citric acid, carbonic acid	Sulfuric acid, carbonic acid
4.5 Bases	–	Lime	Sodium hydroxide, potassium hydroxide, *ammonium* hydroxide	Sodium hydroxide, cement
4.6 Salts	Salty fog	Nitrates, phosphates, chlorides, sulfates	Sodium chloride	Calcium chloride, sulfates, plaster
4.7 Chemically neutral	Neutral dust	Limestone, silica	Fat, oil, ink, neutral dust	Fat, oil, neutral dust
5 Biological agents				
5.1 Vegetable and microbial	Bacteria, seeds	Bacteria, moulds, fungi, roots	Bacteria, house plants	– –
5.2 Animal	Insects, birds	Rodents, termites, worms	Domestic animals	–

Tab. 8.2 – ISO 6241: Classificazione degli agenti di degrado

In questa fase bisogna porre molta attenzione nell'identificare tutti gli agenti che influenzano maggiormente la vita utile del componente edilizio, senza trascurare quelli caratterizzati da bassa intensità ma la cui ciclicità e/o durata potrebbero rendere critici i loro effetti nel tempo.

8.2.3 Individuazione dei sub-fattori

Uno o più requisiti (che condizionano significativamente la durata del componente in condizioni di riferimento) andranno correlate ad ogni effetto.

Queste caratteristiche, se misurabili in fase progettuale con metodi standardizzati, portano alla definizione di sub-fattori, come mostrato dalla seguente **figura 8.3**.

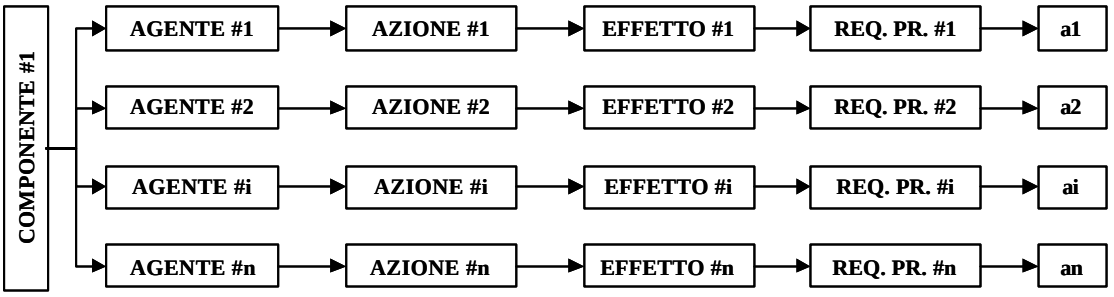

Fig. 8.3 – Il passaggio che porta dagli agenti ai sub-fattori

Questa capacità di tradurre le esigenze dell'utenza finale in requisiti prestazionali definiti da ben precise classi di prestazione (e quindi misurabili in modo univoco) rappresenta un passaggio di estrema importanza nel processo di riduzione della soggettività nell'applicazione del Metodo Fattoriale.

8.2.4 Ricerca della normativa di riferimento

A questo punto, è necessario un sistema di valutazione per ogni sub-fattore.
Il metodo richiede la disponibilità di una scala di valutazione attraverso delle "classi prestazionali", e non solamente attraverso specificazioni di prestazioni minime. Peraltro, questa possibilità di poter valutare la qualità di un componente edilizio in base alla semplice appartenenza ad una classe di prestazione svincola l'utente del Metodo Fattoriale da una conoscenza approfondita dei parametri che governano i requisiti prestazionali.
È opportuno, per una migliore affidabilità della valutazione, riferirsi a standard di riferimento o ad altre fonti comunque autorevoli. Va notato che una condizione necessaria che tutte le fonti devono soddisfare per essere utilizzabili, è la presenza di scale di valutazione in grado di coprire l'intero campo di esistenza delle prestazioni del componente.
La seguente **figura 8.4** mostra ad esempio come sia possibile, nel caso della durezza superficiale, rifarsi alla norma UNI EN 101, che si avvale della scala di Mohs.

MATERIALE DI RIFERIMENTO	DUREZZA SUPERFICIALE
Talco	1
Gesso	2
Calcite	3
Fluorite	4
Apatite	5
Feldspato	6
Quarzo	7
Topazio	8
Corindone	9
Diamante	10

Fig. 8.4 – Classi di prestazione definite dalla UNI EN 101

8.2.5 Creazione delle griglie di valutazione per il componente di riferimento

Questo punto è il più complicato della procedura proposta e per questo motivo dovrebbe essere compiuto da esperti; auspicabilmente, i produttori stessi dovrebbero partecipare alla creazione di tali griglie, che in seguito andrebbero validate attraverso sperimentazione.
Le griglie di valutazione sono semplicemente delle funzioni, che ricevono come dati di input tutte le classi di prestazioni trovate negli standard di riferimento e che restituiscono particolari valori.
Dal momento che il Metodo Fattoriale è basato sul confronto tra condizioni di riferimento e condizioni di esercizio, e dal momento che le griglie di valutazione sono costruite partendo dalle condizioni di riferimento del componente edilizio, l'utente dovrà limitarsi a collocare all'interno della griglia la specificazione di prestazione; così facendo, il confronto tra i due componenti avverrà automaticamente.

Tutte le griglie di valutazione sono caratterizzate dal fatto che:

- Il valore "1" è associato alla classe di prestazione in condizioni di riferimento;
- Tutte le griglie contengono funzioni monotòne (crescenti o decrescenti), con grado uguale o superiore ad 1;
- L'insieme di valori è maggiore o uguale a "0".

La **figura 8.5** mostra un esempio di griglia di valutazione per un determinato sub-fattore; la condizione di riferimento del componente edilizio coincide con la classe di prestazione evidenziata. Si noti come alla classe di riferimento sia associato il valore "1" e come la funzione non debba essere necessariamente lineare. Nell'esempio in figura gli estremi della funzione coincidono con i valori "0,2" e "6".

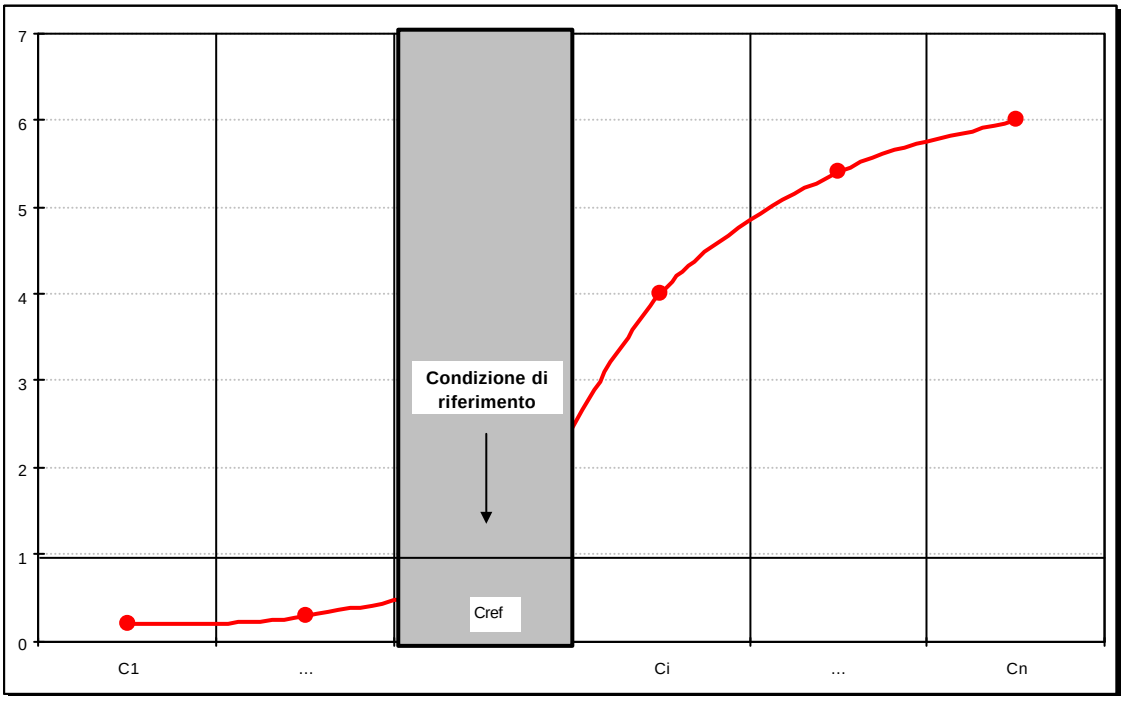

Fig. 8.5 – Esempio di griglia di valutazione: classi di prestazione e valori ad esse associati

Le classi di riferimento sono estremamente importanti; una vita utile di riferimento pari a 20 anni, ad esempio, andrà interpretata come un valore di vita utile ottenuto da un componente con caratteristiche tali da ricadere nelle classi prestazionali di riferimento. Le griglie, una volta costruite, consentiranno all'utente di "correggere" tale valore di vita utile a seconda delle caratteristiche del componente da lui adottato all'interno dello specifico progetto d'intervento. Chiaramente, se il componente di progetto possiederà caratteristiche prestazionali analoghe a quelle del componente di riferimento, le griglie restituiranno (come fattori di correzione per ogni sub-fattore) solamente valori nulli, che non andranno a modificare in alcun modo il valore di durata.

Un possibile modo di procedere per la creazione delle griglie può essere il seguente: si supponga di avere ottenuto il valore di vita utile di riferimento per un particolare componente edilizio (RSL_{c1}), caratterizzato da "n" classi prestazionali (associate ad altrettanti sub-fattori) che, per questo, saranno definite classi di riferimento. Tali classi saranno caratterizzate (per definizione) da valori pari a "1". A questo punto si può ricalcolare la vita utile di riferimento di un secondo componente edilizio (RSL_{c2}) simile al primo per "n–1" classi (sub-fattori), in modo da riuscire a determinare il fattore correttivo tra i due componenti indagati come quel valore di passaggio da RSL_{c1} a RSL_{c2} (**figura 8.6**).

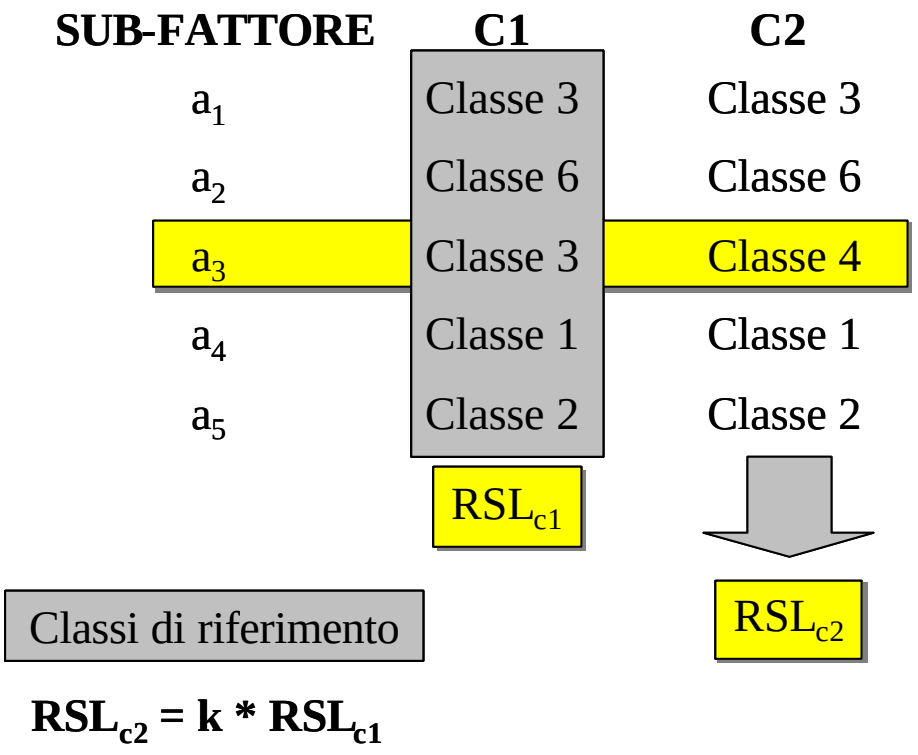

Fig. 8.6 – Griglie di valutaione: determinazione dei valori

Così facendo sarà possibile ottenere i valori da associare ad ogni classe prestazionale, per ogni sub-fattore. Come vedremo, il vantaggio di questo modo di procedere consiste nel fatto che dette griglie andranno realizzate una volta per tutte, consentendo poi di valutare in modo automatico la vita utile di componenti edilizi che si scostano da quello di riferimento anche in modo sostanziale.

8.2.6 Attribuzione dei pesi ai sub-fattori

Una volta definiti gli "n" sub-fattori sulla base delle considerazioni fatte in precedenza, è possibile valutare l'importanza relativa di ogni requisito rispetto agli altri.
Andrebbe posta particolare attenzione al fatto che confronti tra le prestazioni, in questa fase, rappresentano precise scelte progettuali; la priorità di un sub-fattore su un altro è determinata volta per volta dal progettista stesso, in seguito considerazioni circa:

- La destinazione finale dell'ambiente in cui componente edilizio si troverà ad operare;
- La tipologia dell'utente finale;
- Il carico ambientale e le condizioni di esercizio;
- …

La **tabella 8.7** mostra come possano variare le esigenze prestazionali del progettista in relazione, ad esempio, alle differenti destinazioni d'uso cui sarà soggetto il componente edilizio:

REQUISITO PRESTAZIONALE PRINCIPALE	DESTINAZIONE D'USO
Resistenza all'abrasione	Corridoi, classi, …
Resistenza allo scivolamento	Bagni, cucine, …
Resistenza al punzonamento	Archivi, biblioteche, …

Tab. 8.7 – Esempi di priorità prestazionali

Come metodo standardizzato nell'attribuzione dei valori, viene proposto l'uso di una matrice di valori non grado di confrontare tutti i sub-fattori. Questo metodo è analogo a quello proposto nell'allegato A del D.P.R. 554 del 21 dicembre 1999[46] ai fini della determinazione dei coefficienti per la valutazione di ogni criterio qualitativo delle varie offerte. Anche in questo caso dunque verrà adottata la compilazione di una matrice, detta *matrice di confronto a coppie* (vedi **figura 8.8**), al fine di comparare l'importanza di ciascun sub-fattore rispetto a tutti gli altri.

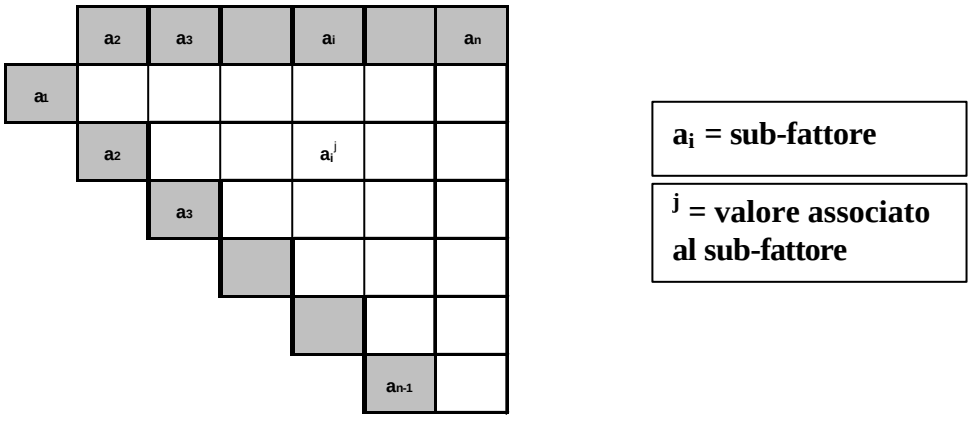

Fig. 8.8 – Matrice di confronto a coppie

[46] Regolamento di Attuazione della Legge Quadro in materia di Lavori Pubblici, L. 109/94 e s.m.i.

Per meglio chiarire le modalità di compilazione della matrice vengono esplicitati tutti possibili casi che potrà trovarsi ad affrontare il progettista:

- **Parità di un sub-fattore rispetto all'altro**: nella matrice andranno inseriti entrambi i codici di riferimento dei sub-fattori, accompagnati da un apice che ne indica il punteggio (1);
- **Prevalenza di un sub-fattore rispetto all'altro**: nella matrice andrà inserito il codice di riferimento del sub-fattore che prevale nel confronto, accompagnato da un apice che ne indica il punteggio (1);
- **Forte prevalenza di un sub-fattore rispetto all'altro**: nella matrice andrà inserito il codice di riferimento del sub-fattore che prevale nel confronto, accompagnato da un apice che ne indica il punteggio (2).

Ricapitolando, un confronto tra due sub-fattori (a_n e a_m) può dare luogo a cinque possibili risultati:

- a_n^2 Forte prevalenza di a_n su a_m;
- a_n^1 Prevalenza di a_n su a_m;
- $a_n^1 a_m^1$ Equivalenza tra a_n e a_m;
- a_m^1 Prevalenza di a_m su a_n;
- a_m^2 Forte prevalenza di a_m su a_n.

La somma dei valori ottenuti da ogni sub-fattore consente di ottenere una classificazione in merito all'importanza dei differenti requisiti prestazionali.

8.2.7 Attribuzione dei valori al componente di progetto

A questo punto è necessario riconsiderare gli standard precedentemente individuati ed utilizzati per creare le griglie di valutazione, con lo scopo di valutare il componente di progetto.
Per fare questo, ogni requisito prestazionale del componente è identificato da una ben precisa classe di prestazione all'interno delle scale di valutazione, ottenendo un valore correlato allo specifico sub-fattore. Per ogni sub-fattore sono possibili tre casi:

- **V > 1:** Il componente di progetto fornisce prestazioni migliori di quelle fornite dal componente di riferimento;
- **V = 1:** Il componente di progetto fornisce prestazioni simili a quelle fornite dal componente di riferimento;
- **V < 1:** Il componente di progetto fornisce prestazioni peggiori di quelle fornite dal componente di riferimento.

L'intera procedura può essere facilmente ripercorsa grazie all'ausilio delle due tabelle seguenti, che costituiscono dei *format* sviluppati appositamente per accompagnare il progettista fino al calcolo del valore finale del fattore A.
La **tabella 8.9** propone una scheda da riempire per ogni componente edilizio presente all'interno del progetto, ed identificato univocamente da un codice ben preciso, ricavato a partire dalla UNI 8290. Attraverso il format riportato di seguito, il progettista è accompagnato nel processo che lo conduce dall'individuazione degli agenti fino alla determinazione dei sub-fattori.

La presa di coscienza degli effetti che possono manifestarsi a seguito di determinate azioni consente un'agevole determinazione dei requisiti prestazionali da richiedere al componente edilizio oggetto di studio.

Elemento tecnico					Codice
Componente edilizio					Codice
Agente (Classificazione ISO 6241)		**Azione**	**Effetto**	**Requisito prestazionale**	**Sub-fattore**
Natura	**Origine**				

Tab. 8.9 – Format proposto per l'identificazione dei sub-fattori

Il collegamento diretto alla normativa permetterà il passaggio teso al confronto tra il componente di riferimento e quello di progetto.

La **tabella 8.10** rappresenta una scheda per il confronto tra l'elemento di riferimento e quello di progetto, possibile grazie all'adozione delle griglie di valutazione.
La colonna 1 ("Sub-fattore") ricalca appieno l'ultima parte della tabella precedente, costituendo pertanto un *trait d'union* con i requisiti prestazionali precedentemente individuati, che per maggiore chiarezza vengono riproposti anche nella presente tabella (colonna 2).
La colonna 3 conterrà al suo interno i riferimenti normativi.
Le colonne 4, 5 e 6 sono relative al componente di riferimento, per il quale sono disponibili dati ottenuti in condizioni di uso e di sollecitazione di riferimento.
Le colonne 7, 8 e 9 si riferiscono al componente edilizio in condizioni di progetto, e quindi andranno riempite con i dati ricavati dalla documentazione tecnica di prodotto. L'ultima colonna, in particolare, conterrà i risultati restituiti dalla matrice di confronto a coppie.

Sub-fattore	**Requisito prestazionale**	**Normativa di riferimento**	**Componente di riferimento**			**Componente di progetto**		
			Classe		**Valore**	**Classe**	**Valore V**	**Peso P**

Tab. 8.10 – Format proposto per il confronto tra componenti di riferimento e di progetto

8.2.8 Calcolo del Fattore A

A questo punto è possibile ricavare il fattore A, attraverso una media ponderata dei valori V_i ottenuti dalla valutazione delle prestazioni (§ 8.2.7) ed usando i pesi P_i dedotti precedentemente (§ 8.2.6).
La semplice formula è la seguente:

$$\textbf{Fattore A} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i * P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \quad \text{dove}$$

V = Valore del sub-fattore
P = Peso del sub-fattore
n = Numero dei sub-fattori

8.3 Caso di studio

A scopo illustrativo viene presentato un caso di studio, in cui la procedura proposta nelle pagine precedenti è stata applicata ad un edificio adibito ad albergo; poiché la procedura opera a livello di componente edilizio, è stata focalizzata l'attenzione sulla pavimentazione del locale cucina, finita con piastrelle in grès fine porcellanato antiscivolo [Coccè 2004].

8.3.1 Organizzazione razionale delle informazioni preliminari

Per prima cosa si è proceduto alla contestualizzazione dell'intervento edilizio, dal momento che tali informazioni saranno di notevole importanza nell'applicazione del Metodo Fattoriale completo. Per quanto la nostra esposizione si interrompa alla determinazione del fattore A, non va dimenticato che scopo del metodo è quello di tradurre la vita utile di riferimento (determinata in condizioni standard di uso e di sollecitazione) in vita utile nelle effettive condizioni di progetto.
E' quindi buona norma abituarsi fin da subito a tenere conto del reale carico ambientale che agirà sulla struttura. La **tabella 8.11** raccoglie i dati climatici dell'intervento, localizzato nella zona occidentale della città di Milano.

Localizzazione	Località	**CORNAREDO**
	Latitudine	**N 45° 30'**
	Longitudine	**E 09° 01'**
	Altitudine	**146 m slm**
	Gradi giorno	**2386 GG**
	Zona climatica	**E**
	Durata riscaldamento	**180 gg**
	Destinazione d'uso	**ALBERGO**
	Categoria	**E1 (3)**
Principali parametri climatici	Regione di vento	**A**
	Zona di vento	**1**
	Località di rif.	**MILANO**
	Coeff. correttivo	**1**
	Velocità del vento	**1,1 m/s**
	Direzione prevalente	**SW**
	Zona di neve	**1**
	Carico neve al suolo	**1,60 kN/m^2**
	T. est. min.di progetto	**-5 °C**

Tab. 8.11 – Contestualizzazione dell'intervento edilizio

La **figura 8.12** riporta invece un estratto degli elaborati grafici contenenti il locale cucina, ove sarà posato il componente edilizio oggetto di studio. Le informazioni che se ne possono ricavare, di carattere distributivo, funzionale e tecnologico, potranno essere utili nella determinazione dei punteggi relativi ai rimanenti fattori del metodo.

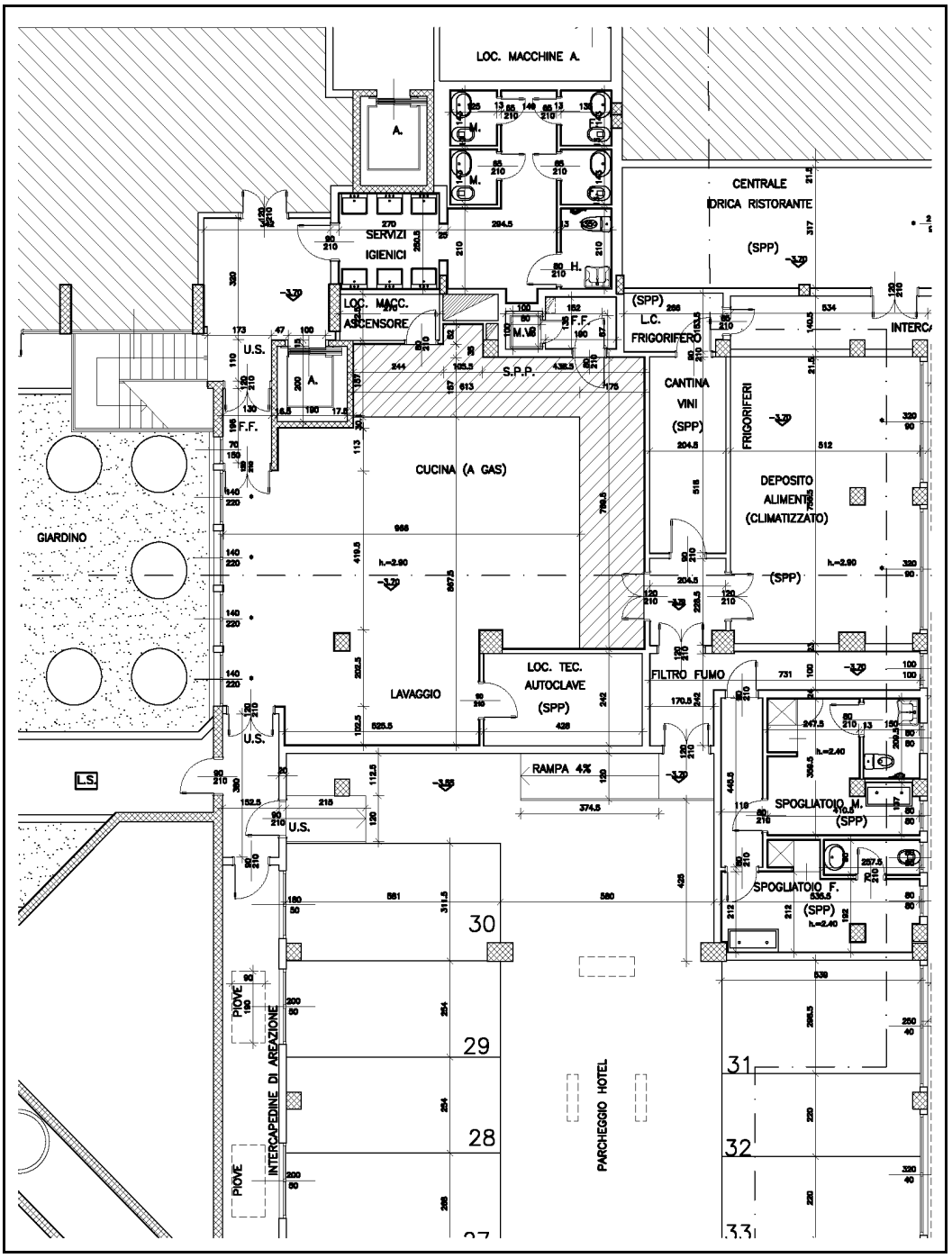

Fig. 8.12 – Estratto degli elaborati grafici contenenti il locale cucina

Una volta contestualizzato l'intervento è importante destrutturare l'intero edificio, fino ad arrivare al livello di componente edilizio; per fare ciò sono stati aggiunti due ulteriori livelli alla norma UNI 8290/1, che consentono di raggiungere lo scopo prefissatoci. La **tabella 8.13** rappresenta un estratto della WBS (Work Breakdown Structure) condotto fino al sesto livello.

Il componente edilizio (pavimento in grès porcellanato antiscivolo, posato nel locale cucina) è individuato completamente ed univocamente dal codice 3.3.2.1.2.2. Per l'applicazione della procedura è stato scelto uno dei componenti a più elevato rischio di degrado.

Classe di unità tecnologica	Unità tecnologica	Classe di elemento tecnico	Elemento tecnico		Componente edilizio	
3.3 Partizione interna	3.3.2 Partizione interna orizzontale	3.3.2.1 Solai	3.3.2.1.1	Solaio spogliatoi, servizi dipendenti al piano interrato e locali di servizio ai piani con pavimento incollato	3.3.2.1.1.1	Sottofondo isolato acusticamente
					3.3.2.1.1.2	Pavimento in gres monocottura
			3.3.2.1.2	Solaio cucina del ristorante e depositi di pertinenza con pavimento incollato	3.3.2.1.2.1	Sottofondo isolato acusticamente
					3.3.2.1.2.2	Pavimento in gres porcellanato antiscivolo
			3.3.2.1.3	Solaio sotto i bagni dell'albergo	3.3.2.1.3.1	Sottofondo isolato acusticamente e impermeabilizzato
					3.3.2.1.3.2	Pavimento in gres porcellanato levigato
			3.3.2.1.4	Solaio sotto il bagno foresteria e di tutti i servizi pubblici per albergo e ristorante	3.3.2.1.4.1	Sottofondo isolato acusticamente
					3.3.2.1.4.2	Pavimento in gres porcellanato levigato
			3.3.2.1.5	Solaio sotto lo sbarco ascensore e tunnel di collegamento con la zona fitness al piano interrato, ristorante al piano terra e disimpegni al piano interrato	3.3.2.1.5.1	Sottofondo isolato acusticamente
					3.3.2.1.5.2	Pavimento in gres porcellanato levigato
			3.3.2.1.6	Solaio con pavimento sopraelevato nella zona uffici al 1° - 2° - 3° piano e negli uffici dell'albergo	3.3.2.1.6.1	Sottofondo isolato acusticamente
					3.3.2.1.6.2	Pavimento flottante
			3.3.2.1.7	Controsoffitto zona ingresso, reception, bar, soggiorno, ristorante al piano terra e al piano interrato, corridoi camere, ingresso camere, sbarco ascensore e tunnel al piano interrato	3.3.2.1.7.1	Struttura di sostegno
					3.3.2.1.7.2	Pannelli

Tab. 8.13 – Estratto della WBS recante il componente edilizio; il codice è stato ottenuto a partire dalla norma UNI 8290/1

8.3.2 Analisi agenti – azioni – effetti ed individuazione dei sub-fattori

Questo passaggio della procedura è orientato ad evidenziare i requisiti prestazionali da richiedere al componente edilizio affinché possa opporre un comportamento sufficientemente valido alle azioni degradanti di agenti meccanici, chimici, elettromagnetici, termici e biologici (così come da ISO 6241). Ognuno dei requisiti prestazionali così individuati darà origine ad un sub-fattore che contribuirà a definire la "qualità del componente".

Poiché il metodo prevede l'associazione ad ogni sub-fattore di una normativa di riferimento (italiana od internazionale) contenente *classi di prestazione*, la seguente **tabella 8.14** contiene solo i riferimenti ad agenti di degrado che potranno essere associati a tali classi.
Sarebbe auspicabile che in futuro molte più normative introducessero classi prestazionali che consentano di studiare appieno qualsiasi componente edilizio.

Solaio cucina ristorante					Codice 3.3.2.1.2
Pavimento in grès porcellanato antiscivolo					Codice 3.3.2.1.2.2
Agente (Classificazione ISO 6241)		**Azione**	**Effetto**	**Requisito prestazionale**	**Sub-fattore**
Natura	**Origine**				
Agenti meccanici	Carichi vivi	Incisione della superficie	Presenza di graffi	Durezza superficiale	$\mathbf{a_1}$
Agenti chimici	Acqua	Caduta di acqua	Scivolosità	Resistenza allo scivolamento	$\mathbf{a_2}$
Agenti meccanici	Carichi vivi	Abrasione della superficie	Perdita di omogeneità fisica	Resistenza all'abrasione superficiale	$\mathbf{a_3}$
Agenti chimici	Aceto, acido citrico	Corrosione	Perdita di omogeneità fisica	Resistenza all'attacco chimico	$\mathbf{a_4}$
Agenti biologici	Cibo	Sviluppo di macchie	Perdita di omogeneità estetica	Resistenza alle macchie	$\mathbf{a_5}$

Tab. 8.14 – Analisi agenti-azioni-effetti ed individuazione dei sub-fattori

Come già fatto notare in § 8.2.4, la possibilità di poter valutare la qualità di un componente edilizio in base alla semplice appartenenza ad una classe di prestazione svincola l'utente del Metodo Fattoriale da una conoscenza approfondita dei parametri che governano i requisiti prestazionali[47]. Sarebbe quindi auspicabile che l'evoluzione della normativa tecnica proseguisse in questa direzione.
I cinque requisiti prestazionali individuati al termine di questo processo di analisi sono riportati di seguito; ai suddetti requisiti è stato successivamente associato un sub-fattore, come esposto in § 8.2.3.

- Durezza superficiale (a_1);
- Resistenza allo scivolamento (a_2);
- Resistenza all'abrasione superficiale (a_3);
- Resistenza all'attacco chimico (a_4);
- Resistenza alle macchie (a_5).

[47] Si prenda ad esempio il caso della "resistenza all'urto", determinata dalla UNI EN ISO 10545-5:2000; questo tipo di requisito, per quanto importante, non trova posto nella tabella dal momento che nessuna norma tecnica prevede l'introduzione di classi di prestazione. La UNI (come peraltro anche altre normative di carattere internazionale quali le UPEC) valuta tale requisito in seguito alla determinazione del coefficiente di restituzione o, alternativamente, in base all'intervallo di tempo intercorso tra i primi due rimbalzi di una biglia di acciaio che colpisce (in caduta libera) la piastrella. L'infomazione di un intervallo di tempo pari a 0,7 decimi di secondo può non essere di alcuna utilità al progettista poco esperto, ma se la norma prevedesse la presenza di "classi prestazionali" (ad esempio da C1 a C5), i risultati delle prove sarebbero chiaramente comprensibili e direttamente correlabili alla qualità del componente.

8.3.3 Normativa di riferimento e griglie di valutazione

Come già detto, è fondamentale riferirsi a normative di riferimento che prevedano l'adozione di classi di prestazione; i cinque aspetti messi in luce nel paragrafo precedente pertanto possono essere utilizzati per la creazione (che avverrà una volta sola per ogni tipo di componente edilizio) di "griglie di valutazione" che consentiranno all'utente del Metodo Fattoriale un agevole confronto tra il componente edilizio di riferimento e quello adottato all'interno dello specifico progetto di intervento.
Vediamo ora più nel dettaglio cosa è avvenuto per ogni sub-fattore identificato.
Va ricordato che la creazione delle griglie di valutazione andrebbe compiuta da esperti del settore (auspicabilmente coadiuvati dai produttori stessi di componenti edilizi); inoltre si vuole sottolineare il fatto che tale lavoro avverrebbe una volta per tutte, consentendo al progettista (di volta in volta) di utilizzare griglie predefinite per operare il confronto col proprio componente edilizio. Ai fini illustrativi e di applicazione della procedura ad un caso di studio, questo passaggio è stato compiuto in ambito dipartimentale e senza la pretesa che i valori delle griglie mostrate nelle pagine seguenti siano esatti.

- *Sub-fattore a_1 – Durezza superficiale*

La normativa adottata è la UNI EN 101[48], che prevede al suo interno 10 classi di prestazione per valutare la durezza superficiale di una piastrella in ceramica; conclusa la prova, il componente apparterrà ad una delle classi di prestazione che vanno dalla prima (talco) alla decima (diamante). Il procedimento consiste nell'individuare la presenza di graffi sulla superficie della piastrella a seguito di sfregamento con materiali di durezza nota. La **figura 8.15** mostra la griglia di valutazione creata per questo sub-fattore.

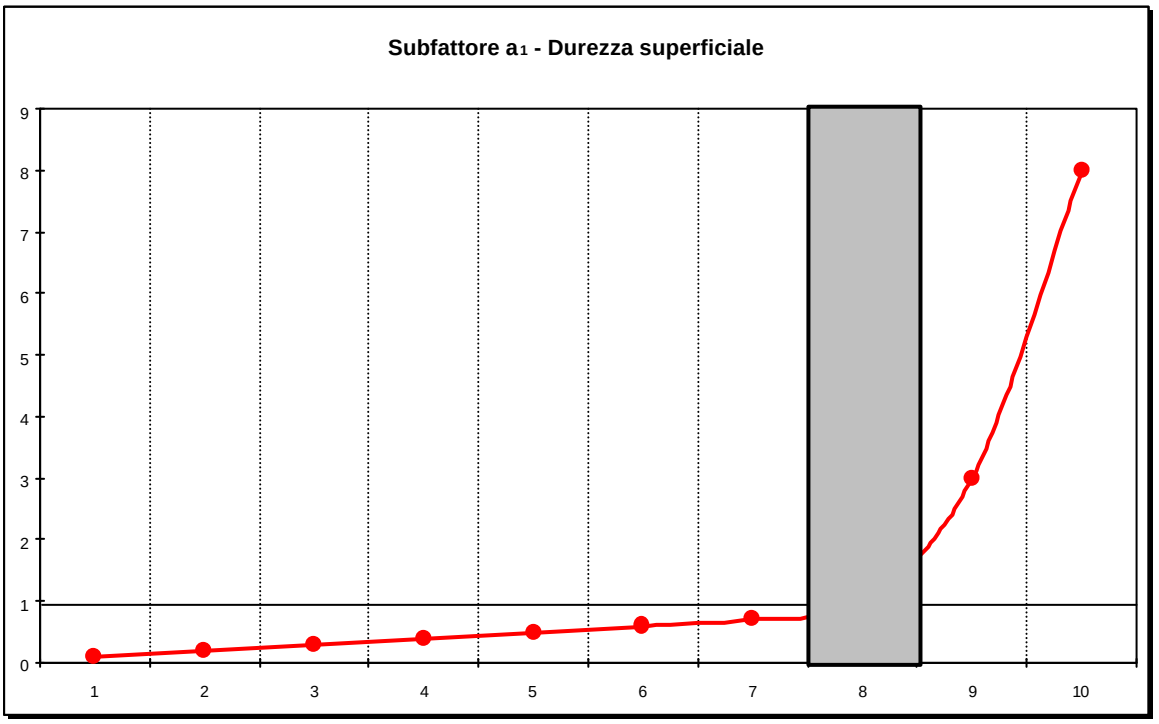

Fig. 8.15 – Griglia di valutazione relativa al sub-fattore a_1

[48] UNI EN 101:1992 *Piastrelle di ceramica – Determinazione della durezza della superficie secondo la scala di Mohs*

- *Sub-fattore a_2 – Resistenza allo scivolamento*

La norma DIN 51130[49] ben si presta ad essere utilizzata all'interno di questa procedura, prevedendo 5 classi di prestazione (da R9 a R13) in base all'angolo di scivolamento α. La prova consiste nel cospargere un pavimento realizzato con il componente edilizio in questione con un olio di viscosità normalizzata, per poi determinare l'inclinazione media che comporta pericolo per la stabilità delle persone.
Una possibile griglia di valutazione relativa al sub-fattore a_2 è rappresentata nella **figura 8.16**.

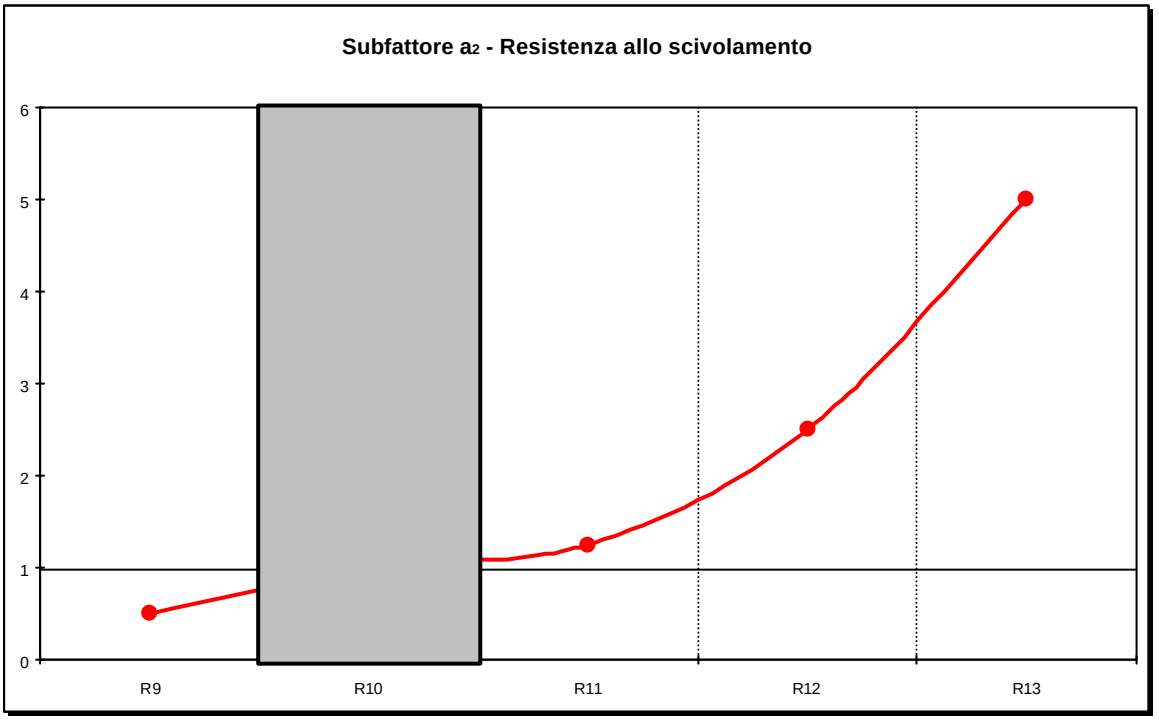

Fig. 8.16 – Griglia di valutazione relativa al sub-fattore a_2

- *Sub-fattore a_3 – Resistenza all'abrasione superficiale*

La UNI EN ISO 10545 – 7[50] prevede prove di abrasione compiute a cicli prefissati; la prova si interrompe dopo un numero di cicli tale da produrre effetti visibili sulla piastrella. La classificazione delle piastrelle avviene attraverso l'adozione di 6 classi (da 0 a 5).
Una possibile griglia è riportata in **figura 8.17**.

[49] DIN 51130 *Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Arbeitsräume und Arbeitsbereiche mit Rutschgefahr, Begehungsverfahren – Schiefe Ebene*
[50] UNI EN ISO 10545 – 7:2000 *Piastrelle di ceramica – Determinazione della resistenza all'abrasione superficiale per piastrelle smaltate*

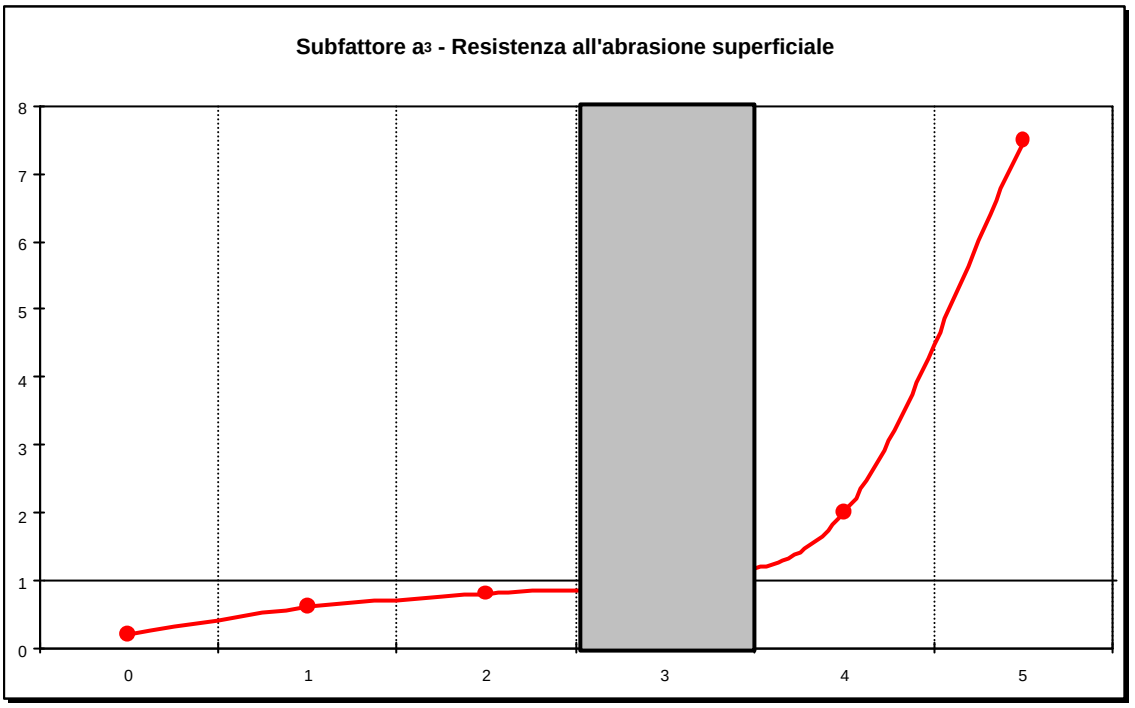

Fig. 8.17 – Griglia di valutazione relativa al sub-fattore a_3

- *Sub-fattore a_4 – Resistenza all'attacco chimico*

Classi di prestazione per questo requisito prestazionale vengono definite dalla norma internazionale UNI EN ISO 10545 – 13[51]. In questo caso il campione di prova viene sottoposto all'azione della soluzione di prova e la determinazione dell'attacco avviene tramite l'esame visivo dopo un periodo definito. Si perviene alle 3 classi di prestazione definite dalla norma attraverso il procedimento riprodotto in **figura 8.18**.

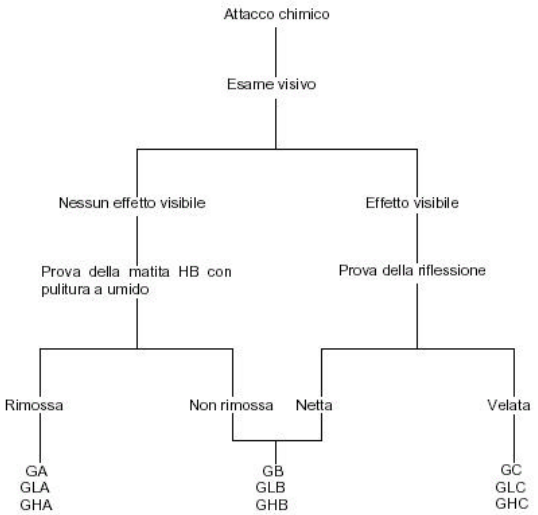

Fig. 8.18 – Determinazione della resistenza all'attacco chimico

[51] UNI EN ISO 10545 – 13:2000 *Piastrelle di ceramica – Determinazione della resistenza chimica*

In questo caso (**figura 8.19**) si è supposto un comportamento "simmetrico" del componente edilizio.

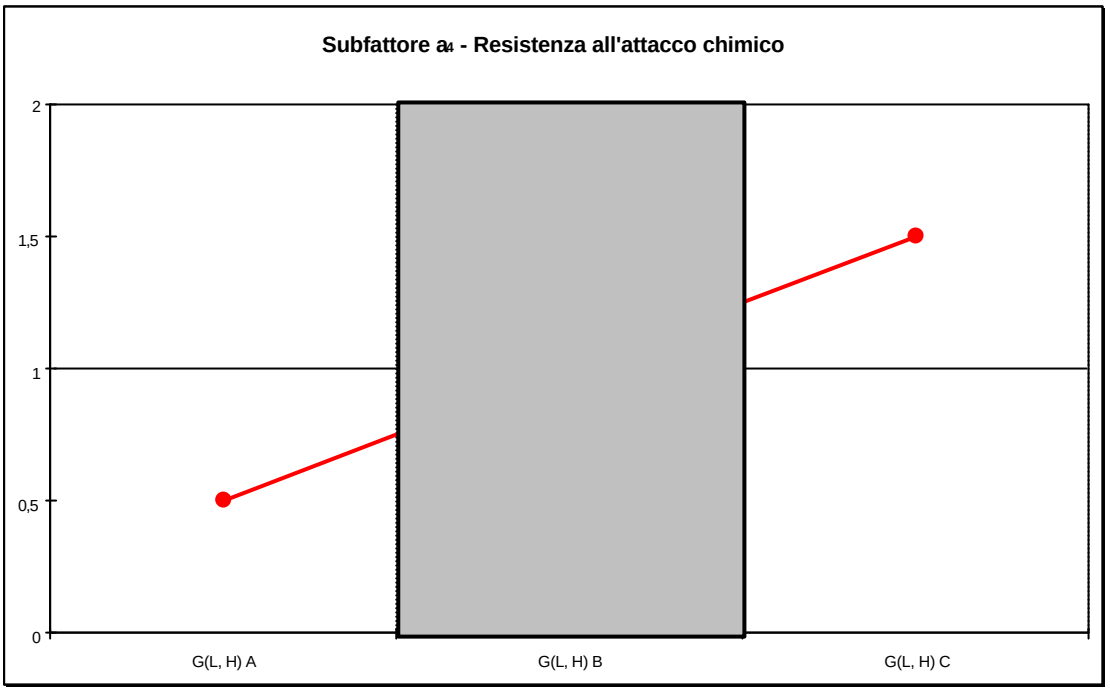

Fig. 8.19 – Griglia di valutazione relativa al sub-fattore a_4

- *Sub-fattore a_5 – Resistenza alle macchie*

L'ultimo sub-fattore riguarda la resistenza alle macchie. Classi di prestazione (5) sono individuate dalla UNI EN ISO 10545 – 14[52]. La determinazione della resistenza alle macchie avviene mantenendo le soluzioni di prova e i materiali in contatto con la superficie di esercizio delle piastrelle per un opportuno periodo di tempo; le superfici sono poi sottoposte a determinati metodi di pulizia ed infine ispezionate per individuare le modificazioni visibili. La classificazione avviene secondo lo schema di **figura 8.20**. Tale procedura prevede, per la rimozione delle macchie, l'uso di agenti pulenti deboli e panni umidi (o spugne naturali non abrasive).
La griglia di valutazione esemplificativa (**figura 8.21**) prevede come classe di riferimento la quarta (C4).

[52] UNI EN ISO 10545 – 14:2000 *Piastrelle di ceramica – Determinazione della resistenza alle macchie*

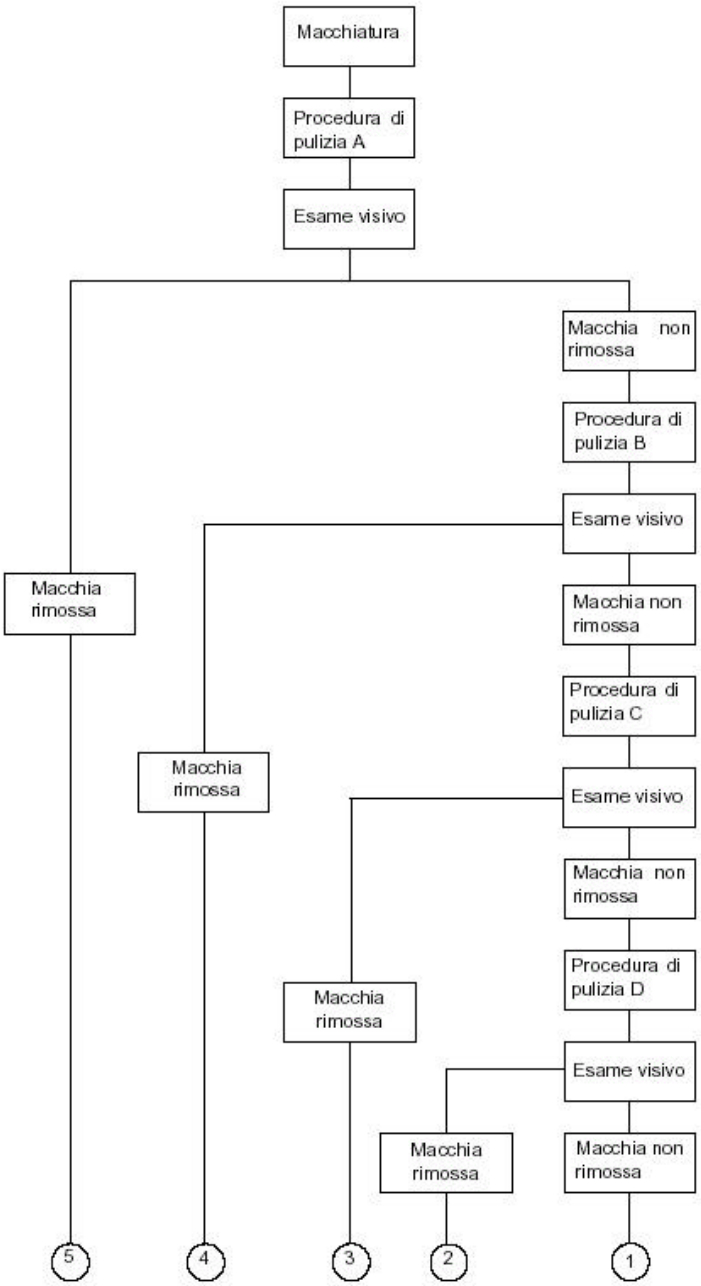

Fig. 8.20 – Determinazione della resistenza alle macchie

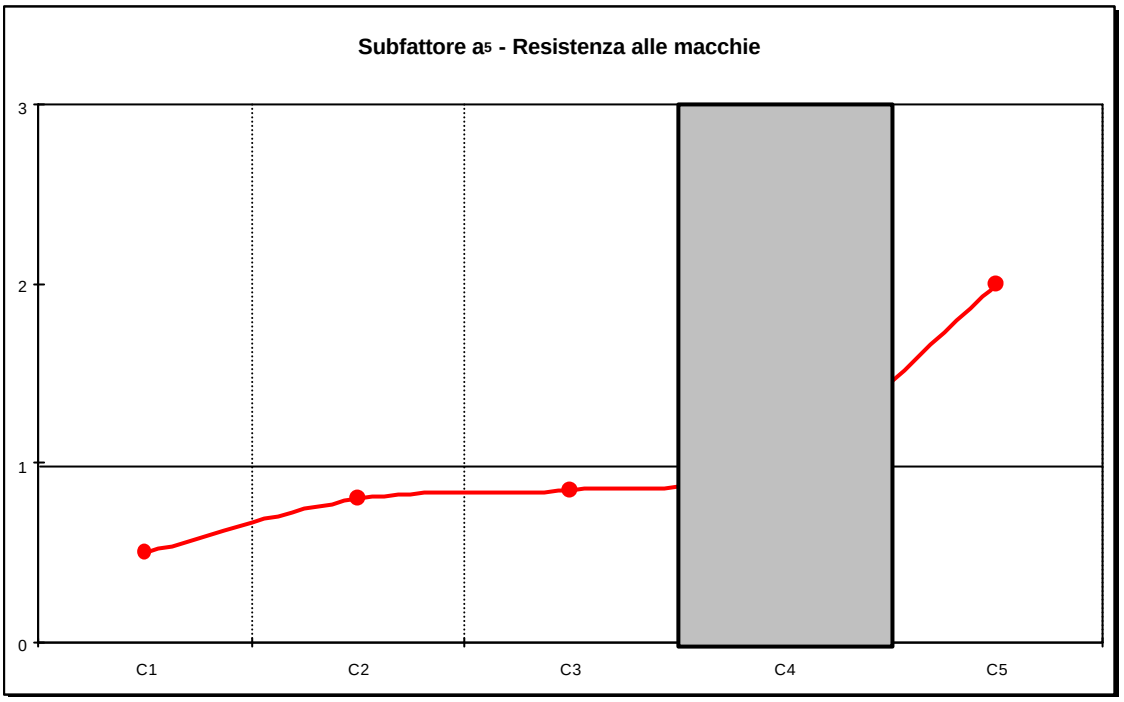

Fig. 8.21 – Griglia di valutazione relativa al sub-fattore a_5

8.3.4 Attribuzione dei pesi ai sub-fattori

L'importanza relativa di ciascun sub-fattore rispetto agli altri è definita dal progettista stesso volta per volta. Nel caso in esame, trattandosi di pavimentazione di locale adibito a cucine è stata data grande rilevanza alla resistenza allo scivolamento (per quanto attiene alla sicurezza delle persone) e alla resistenza alle macchie (per motivi legati all'igiene). In base a tali considerazioni, vere e proprie scelte progettuali che definiscono la priorità dei requisiti posseduti dal componente edilizio, la matrice di confronto a coppie è stata compilata con la simbologia esposta in § 8.2.6 (**figura 8.22**).

	a_2	a_3	a_4	a_5
a_1	a_2^2	$a_1^1 a_3^1$	a_4^1	a_5^2
a_2	a_2^2	a_2^1	$a_2^1 a_5^1$	
a_3	a_4^1	a_5^2		
a_4	a_5^1			

Fig. 8.22 – Matrice di confronto a coppie per la determinazione dei pesi

A seguito della compilazione della matrice è possibile avere un ranking relativo ai sub-fattori considerati (**tabella 8.23**).

SUB-FATTORE	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
PESO	1	6	1	2	6

Tab. 8.23 – Pesi associati ai sub-fattori

Questi pesi servono a ponderare meglio i valori tipici dei componenti edilizio di progetto, sulla base delle considerazioni svolte dal progettista, che avrà ritenuto per una serie di motivi di attribuire ad alcuni sub-fattori priorità più elevate rispetto ad altri.
Si supponga ad esempio che sia stata scelta una piastrella in grès porcellanato caratterizzata dalle seguenti caratteristiche:

- Durezza superficiale: 7
- Resistenza allo scivolamento: R11
- Resistenza all'abrasione superficiale: C2
- Resistenza all'attacco chimico: G (L, H) B
- Resistenza alle macchie: C5

La vita utile di riferimento calcolata andrà corretta in base alle specifiche tecniche della piastrella scelta, la cui qualità si scosterà per alcuni versi da quella della piastrella di riferimento. In particolare il progettista, che durante la compilazione della matrice di confronto a coppie ha ritenuto di attribuire una valenza maggiore ai sub-fattori a_2 ed a_5 (rispettivamente "resistenza allo scivolamento" e "resistenza alle macchie"), andrà a scegliere sul mercato un prodotto con caratteristiche particolarmente buone per quel determinato tipo di prestazioni. Questo farà in modo che la vita utile del componente edilizio risulti (per questi aspetti) superiore a quella del componente di riferimento. Ovviamente il risultato finale terrà conto dei contributi di tutti i sub-fattori, maggiori di zero se incideranno positivamente sulla qualità della piastrella, minori di zero in caso contrario.

A questo punto può essere utile riassumere quanto visto fin qui; nella **tabella 8.24** sono presenti tutte le informazioni necessarie all'applicazione della procedura proposta, a partire dall'individuazione dei sub-fattori fino alla determinazione dei pesi normalizzati.
Nella parte centrale della tabella, per ogni sub-fattore compare in grassetto la classe di riferimento (caratterizzata anche dal valore "1").

Sub-fattore	Requisito prestazionale	Norma di riferimento	Componente di riferimento			Componente di progetto		
			Classe		Valore	Classe	Valore	Peso
a_1	Durezza superficiale	UNI EN 101	Talco	1	0,1	7	0,7	1
			Gesso	2	0,2			
			Calcite	3	0,3			
			Fluorite	4	0,4			
			Apatite	5	0,5			
			Feldspato	6	0,6			
			Quarzo	7	0,7			
			Topazio	**8**	**1**			
			Corindone	9	3			
			Diamante	10	8			
a_2	Resistenza allo scivolamento	DIN 51130	3°< α 10°	R9	0,5	R11	1,25	6
			10°< α 19°	**R10**	**1**			
			19°< α 27°	R11	1,25			
			27°< α 35°	R12	2,5			
			α > 35°	R13	5			
a_3	Resistenza all'abrasione superficiale	UNI EN ISO 10545-7	n = 100	C0	0,2	C2	0,8	1
			n = 150	C1	0,3			
			n = 600	C2	0,8			
			n = 750	**C3**	**1**			
			n = 2100	C4	2			
			n = 12000*	C5	7,5			
a_4	Resistenza all'attacco chimico	UNI EN ISO 10545-13	Nessun effetto	G (L, H) A	0,5	G (L, H) B	1	2
			Attacco leggero	**G (L, H) B**	**1**			
			Attacco profondo	G (L, H) C	1,5			
a_5	Resistenza alle macchie	UNI EN ISO 10545-14	Proc. A	C5	0,5	C5	0,5	6
			Proc. B	C4	0,8			
			Proc. C	C3	0,85			
			Proc. D	**C2**	**1**			
			Non rimozione	C1	2			

Tab. 8.24 – Definizione delle griglie di valutazione e confronto tra i componenti di riferimento e di progetto

Si noti in particolare come:

- Ad ogni sub-fattore venga fatto corrispondere un requisito prestazionale e, di riflesso, una normativa di riferimento in grado di valutare tale requisito sulla base di classi di prestazione ben definite;
- La parte centrale della tabella sia dedicata al componente di riferimento (il valore "1" indica la condizione di riferimento del componente);
- La parte finale della tabella contenga informazioni relative al componente di progetto; se il progettista ritiene che le caratteristiche del componente da lui scelto siano simili a quelle del componente di riferimento dovrà inserire valori pari a "1". Prestazioni migliori o peggiori daranno origine a valori rispettivamente maggiori o minori di "1", predefiniti all'interno delle griglie di valutazione;
- L'ultima colonna della tabella sia frutto della compilazione della matrice di confronto a coppie (per definire il grado di importanza dei differenti sub-fattori).

8.3.5 Calcolo del Fattore A

L'ultimo passaggio, consta nel determinare il valore del Fattore A, media ponderata dei valori V_i e dei pesi normalizzati P_i, relativi al componente di progetto (rispettivamente colonne 8 e 9 della tabella precedente).
Sempre con la simbologia adottata in § 8.2.8,

$$\textbf{Fattore A} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i * P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} = \frac{0,7*1+1,25*6+0,8*1+1*2+0,5*6}{16} = 0,875$$

Supponendo che test condotti in laboratorio abbiano fornito una vita utile di 20 anni, **per il solo contributo dovuto al fattore A** "Qualità del componente" questo valore di riferimento verrà modificato in un valore pari a 17,5 anni.

RSL = 20 anni —Fattore A→ **ESL(A) = 17,5 anni**

8.4 Sviluppi futuri della ricerca

La ricerca precedentemente illustrata, pur conservando la filosofia di fondo sulla quale è stato sviluppato il Metodo Fattoriale "classico", fa sì che il metodo stesso muova verso un ambito più ingegneristico.
L'adozione di strumenti quali le griglie di valutazione e la matrice di confronto a coppie, unitamente ad un approccio prestazionale legato alla valutazione della qualità tecnologica caratteristica, ne raffinano la capacità di predizione senza, peraltro, comportare un eccessivo sovraccarico di lavoro per l'utente finale.
Per quanto riguarda i limiti ad oggi presenti nella proposta di calcolo del fattore A ("Qualità del componente") va senz'altro rilevata la difficoltà di reperire nel contesto normativo italiano ed internazionale normative di natura prestazionale, che prevedano classi di prestazione tali da estendere la creazione delle griglie di valutazione ad un repertorio sufficientemente vasto di componenti edilizi; di più, andrebbero riviste le normative tecniche di prodotto già esistenti che però ancora non prevedono l'adozione di classi di prestazione quantomeno per tutti i requisiti principali richiesti al componente[53].
Sarebbe poi auspicabile che dette griglie venissero standardizzate e adottate per lo meno a livello nazionale da produttori di componenti omogenei. Così facendo peraltro si potrebbe concretamente rendere il metodo alla portata di tutti, svincolando il progettista (che probabilmente nella maggioranza dei casi non possiede nemmeno tutte le nozioni per operare in questo senso) dalla realizzazione delle griglie stesse e, più in generale, dalla conoscenza di tematiche strettamente correlate all'ambiente durabilistico.

[53] Si pensi per esempio quanto influirebbero requisiti quali la resistenza all'urto, alla flessione e agli sbalzi termici nella valutazione della qualità del componente edilizio oggetto di studio; la mancanza di classi di prestazione non ha consentito di estendere ad esse la procedura proposta, riducendo il numero di sub-fattori da tenere in considerazione.

Per esempio, il componente di riferimento su cui sviluppare le prove di invecchiamento per la determinazione della vita utile di riferimento potrebbe essere proprio quel componente le cui caratteristiche principali corrispondono alla classe di riferimento all'interno delle griglie di valutazione.
Inoltre, aver già tradotto le esigenze in requisiti prestazionali identificati da parametri ben precisi consentirà di impostare correttamente, a cascata, anche indicazioni e linee guida per il fattore G ("Livello di manutenzione"), essendo proprio la manutenzione definita come quella "combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, durante il ciclo di vita di un'entità, volte a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta"[54].
Questo processo, difatti, richiede a monte l'individuazione di soglie prestazionali oltre le quali determinate prestazioni non sono più erogate con un'intensità tale da garantirne il mantenimento nel tempo dei requisiti richiesti.
Infine, la naturale estensione della procedura a tutti i fattori previsti dal Metodo Fattoriale contribuirà in maniera significativa alla riduzione del grado di soggettività, che ad oggi ne rappresenta il principale difetto.

[54] UNI EN 13306:2003 *Manutenzione – Terminologia*

3ª PARTE

Proposizione di ulteriori percorsi metodologici

Cap. 9 La stima della propensione alla durabilità: un'integrazione metodologica

9.1 Il Performance Limits Method (PLM)

Se con la ricerca illustrata nel capitolo 8 ci siamo mossi in un ambito "pseudo-ingegneristico", l'approccio da cui trae origine il metodo dei limiti prestazionali (PLM) colloca a tutti gli effetti quest'ultimo all'interno della famiglia dei metodi ingegneristici, peraltro ad oggi ancora molto scarsa.
L'idea di fondo è quella di correlare direttamente la vita utile di un componente edilizio con le prestazioni da esso stesso fornite, per poter compiere un'analisi durabilistica incentrata sulla capacità di mantenere nel tempo (di vita utile) le prestazioni per le quali il componente stesso è stato pensato, progettato e realizzato.
La ricerca di carattere metodologico sviluppata in questi anni all'interno del DBCG si integra coerentemente con quella di tipo sperimentale già illustrata nel capitolo 7 e relativa alla classe di elementi tecnici "pareti perimetrali verticali non portanti", cosicché il metodo è stato pensato fin dall'inizio come strumento di ausilio nello studio di prestazioni relative al soddisfacimento del comfort termo-igrometrico dell'ambiente individuato e definito da una serie di pacchetti tecnologici a sistema.
Va quindi chiarito fin dall'inizio il campo di applicazione del metodo che, per sue caratteristiche intrinseche, è applicabile fondamentalmente alla determinazione della vita utile legata a decadimenti prestazionali che influiscono sulle condizioni di comfort ambientale dell'edificio.
Questo tipo di approccio richiede l'individuazione di soglie prestazionali per i requisiti tecnologici ed ambientali, e successivamente l'adozione di modelli di calcolo che simulino l'andamento delle prestazioni nel tempo sino al raggiungimento dei "limiti prestazionali", vere e proprie "barriere" oltre le quali il componente edilizio non è più in grado di soddisfare i requisiti ad un livello sufficiente, atto garantire il comfort dell'utente finale.

L'approccio utilizzato con questo metodo consente di fornire finalmente chiari riferimenti numerici a problemi spesso affrontati da un punto di vista approssimantivo e qualitativo.
E' facile, infatti, in ambito prestazionale, imbattersi in locuzioni del tipo *normale funzionamento* di un componente edilizio o *sufficiente livello di comfort* all'interno di un ambiente.
Ma cosa ci chiede espressamente l'utente finale che fruirà dell'intervento edilizio? In altre parole, come si possono tradurre i limiti minimi di qualità richiesti dall'utente (o più in generale dal committente) in limiti di qualità relativi al componente edilizio? E soprattutto, come possiamo tradurre le specificazioni di prestazione in specifiche tecniche legate alle caratteristiche del componente[55]?
Per quel che riguarda il primo problema, ovvero identificare le soglie di comfort ambientale, ci si può muovere in due direzioni: se le predette soglie sono da intendersi semplicemente come valori minimi, ci si può riferire a standard nazionali o sovrannazionali, o a vere e proprie leggi. In caso contrario, i limiti possono essere definiti durante la fase di "briefing"

[55] Per la differenza tra "specificazione" e "specifica" si veda *Il processo edilizio (vol. I) – Metodi e strumenti di progettazione edilizia*, § 1.1 "Definizioni propedeutiche" P. N. Maggi, CittàStudi, Milano, 1994.

del processo decisionale, quando il progettista è chiamato a tradurre i bisogni ed i desideri del cliente in più tecniche specificazioni prestazionali.
Il secondo passaggio, legato alla traduzione di prestazioni dello spazio (prestazioni richieste dall'utente, in modo più o meno esplicito) in prestazioni fornite dai componenti edilizi delimitanti lo spazio in esame è più complicato, richiedendo l'adozione di algoritmi di calcolo che ad oggi sono ancora in numero insufficiente a gestire l'intero quadro di prestazioni fornite dal componente edilizio. Come si può facilmente intuire, la presenza di un metodo di calcolo è indispensabile per poter simulare il comportamento nel tempo di un ambiente. Tali modelli richiedono come dati di input tutta una serie di parametri tra i quali, naturalmente, anche un elenco di caratteristiche funzionali, grandezze in grado di influenzare direttamente le prestazioni fornite dal componente edilizio. Oltre a questo tipo di dati, sarà fondamentale contestualizzare l'intervento con parametri sia ambientali che geometrici. La **figura 9.1** mostra un esempio dei dati necessari per l'applicazione del metodo.

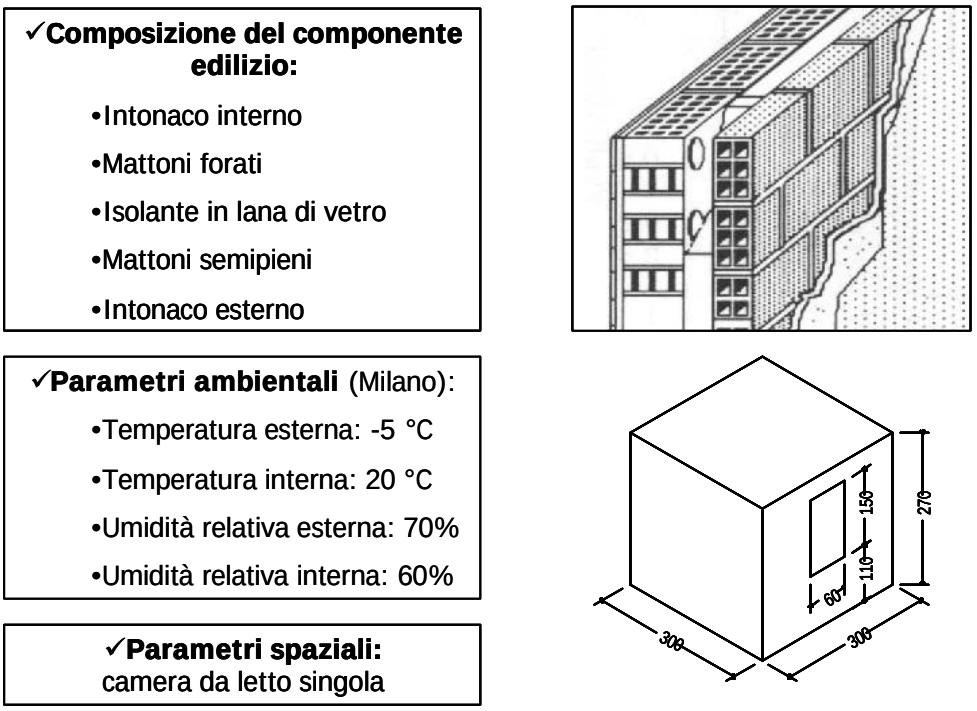

Fig. 9.1 – Esempio di dati necessari per l'applicazione del PLM

Ad oggi il metodo consente di operare sulle principali prestazioni termo-igrometriche che governano il comfort ambientale degli ambienti oggetto di progettazione; in particolare, le prestazioni studiate sono:

- Controllo della condensazione interstiziale;
- Controllo della condensazione superficiale;
- Controllo dell'inerzia termica in stagione invernale;
- Controllo dell'isolamento termico.

Come si può notare, restano fuori dallo studio (per mancanza di algoritmi di calcolo adatti a valutarne il comportamento) importanti prestazioni quali, ad esempio, il controllo acustico e la tenuta all'acqua.

La sottostante **tabella 9.2** consente di correlare ai requisiti analizzati l'elenco delle caratteristiche funzionali coinvolte.

CODICE	REQUISITO	CARATTERISTICHE FUNZIONALI
F1	Controllare la condensazione interstiziale	Conducibilità termica, spessore
F2	Controllare la condensazione superficiale	Conducibilità termica, resistenza alla diffusione del vapore, spessore
F4	Controllare il regime dinamico delle temperature in stagione fredda	Conducibilità termica, calore specifico, densità, spessore
F6	Isolare termicamente	Conducibilità termica, spessore

Tab. 9.2 – Requisiti prestazionali e caratteristiche funzionali associate

Chiaramente gli elementi funzionali caratterizzanti i pacchetti tecnologici andranno descritti più nel dettaglio, fornendo i valori relativi alle caratteristiche funzionali (cfr. **tab. 9.3 e 9.4**).

PARETE NORD					
STRATO	**s [m]**	**λ [W/m°C]**	**ρ [kg/m³]**	**c [kJ/kg°C]**	**μ [-]**
Intonaco interno	0,015	0,9	1800	0,84	35
Mattoni forati	0,08	0,35	800	0,92	6
Lana di vetro	0,04	0,036	20	0,84	1
Mattoni semipieni	0,12	0,44	900	0,92	7
Intonaco esterno	0,015	0,9	1800	0,84	15

Tab. 9.3 – Descrizione parete nord

SOLAIO PAVIMENTO					
STRATO	**s [m]**	**λ [W/m°C]**	**ρ [kg/m³]**	**c [kJ/kg°C]**	**μ [-]**
Intonaco interno	0,015	0,9	1800	0,91	10
Pignatta – travetto	0,160	0,47	1200	0,84	6
Soletta in cls	0,040	1,32	2100	0,88	50
Massetto alleggerito	0,080	0,18	400	0,84	5
Malta cementizia	0,015	1,16	2000	0,88	50
Piastrelle in ceramica	0,010	1	2300	0,84	200

Tab. 9.4 – Descrizione solaio pavimento

Avvenuta la completa caratterizzazione e contestualizzazione dello spazio, si può procedere con la simulazione dei degradi; il comportamento nel tempo chiaramente sarà funzione del tipo di algoritmo utilizzato, per questo è fondamentale rifarsi a norme tecniche, standard internazionali o a limiti minimi introdotti dalla legislazione vigente.

9.2 Modelli di calcolo adottati

In questo paragrafo verranno sinteticamente descritti i modelli di calcolo adottati; attraverso tali modellazioni è possibile tradurre i limiti di qualità ambientale in limiti sulle specifiche tecniche degli elementi funzionali costituenti i componenti edilizi. In questo modo, conoscendo l'andamento nel tempo delle caratteristiche funzionali dei materiali presenti nella soluzione tecnica utilizzata, i limiti sulle specifiche tecniche forniranno indicazioni quantitative sulla durata dei materiali adottati.

Per compiere quest'ultimo passaggio, tuttavia, sarà necessario disporre di "curve di decadimento" delle caratteristiche funzionali che si ricaveranno dalla sperimentazione oggetto del capitolo 7 della presente trattazione.

9.2.1 Controllo della condensazione interstiziale

Lo standard di riferimento per la verifica della condensazione interstiziale è la norma tecnica UNI 10350[56]. Nella norma viene adottato il metodo basato sul noto "diagramma di Glaser", attraverso il quale si modella l'andamento dei profili di pressione parziale e di pressione di vapor saturo all'interno della soluzione tecnica. La condizione di condensazione è data da valori di pressione di vapore pari a quelli di saturazione[57]. In realtà la norma contempla la possibilità di formazione di condensa in una o più zone della soluzione tecnica, a patto che vengano comunque soddisfatti i criteri del "bilancio del vapore annuale" e della "massima quantità di condensa accumulata" (cfr. § 6.5 pag. 8: "Criteri utilizzati per giudicare idonee le strutture"). In questo senso il modello di calcolo da noi adottato si pone a favore di sicurezza, richiedendo che in nessun caso le due curve debbano venire a contatto.

9.2.2 Controllo della condensazione superficiale

Lo standard di riferimento coincide ancora una volta con la UNI 10350. Il modello di calcolo si basa sullo stesso concetto adottato nella norma, ma il principio è semplificato anche in questo caso, e correla direttamente la condizione di funzionamento con il valore di temperatura minima superficiale del componente edilizio, a sua volta funzione della temperatura interna dell'aria. Quando la temperatura superficiale dello strato più interno (minore della temperatura interna a causa degli apporti liminari dello strato d'aria superficiale, cfr. UNI 7357) scende al di sotto di tale soglia, il degrado si considera tale da aver fatto raggiungere la fine di vita utile del componente edilizio.

9.2.3 Controllo del regime dinamico delle temperature in stagione fredda

Non esistendo un modello di calcolo normato per lo studio del controllo dell'inerzia termica invernale, la soluzione è stata quella di riferirsi ad un modello, studiato all'interno del nostro dipartimento da Daniotti *et al*. [1990], e che ha fornito risultati soddisfacenti[58].
In base a tali studi si è pervenuti ad una curva rappresentativa dell'abbassamento termico all'interno della stanza nell'arco delle ore successive allo spegnimento dell'impianto di riscaldamento.
La condizione di progetto è stata ottenuta tenendo conto che il D.P.R. n° 412 del 26/08/93 (D. Att. L. 10/91) impone un numero massimo di ore di accensione degli impanti di riscaldamento, variabile a seconda della zona climatica di appartenenza dell'edificio[59].

---

[56] UNI 10350:1999 *Componenti edilizi e strutture edilizie – Prestazioni igrotermiche: stima della temperatura superficiale interna per evitare umidità critica superficiale e valutazione del rischio di condensazione interstiziale*

[57] Il modello fornisce valori di pressione di vapore anche superiori a quelli di vapor saturo, ma tali soluzioni sono puramente matematiche; per definizione, difatti, la pressione di vapor saturo è la pressione massima possibile, e fisicamente non può accadere che questa risulti inferiore alla pressione parziale di vapore.

[58] Il metodo propone lo studio della caduta termica all'interno di un edificio attraverso la formula:

$$T(t) = T_i * e^{\frac{-t}{RC}} + T_{ex}(1 - e^{\frac{-t}{RC}})$$

Si veda anche Sartoretti [1995].

Durante questo periodo, sarà cura del progettista verificare che la caduta termica non scenda sotto un valore limite, che nella fattispecie potrebbe essere fissato nel valore di 17 °C[60].

9.2.4 Controllo dell'isolamento termico

L'isolamento termico viene di fatto garantito attraverso il controllo della temperatura operante[61] e della temperatura media radiante[62]. Per gli edifici residenziali una temperatura operante di 19 °C si può considerare un valore ottimale. La temperatura media radiante che ne consegue risulterà pertanto espressa dalla seguente formula:

$$T_{mr} = 2T_{op} - T_{ai}$$

dove:

T_{mr} = temperatura media radiante;
T_{op} = temperatura operante;
T_{ai} = temperatura dell'aria interna.

Il modello di calcolo consente di calcolare la temperatura media radiante in un punto di un ambiente parallelepipeidale come:

$$T_{mr} = \left[\sum_i T_{si} * \Phi_i\right]^{0,25} - 273{,}16$$

con:

T_{si} = temperatura superficiale del componente edilizio i-esimo, in gradi Kelvin;
Φ_i = fattore di forma[63] relativo alla superficie i-esima.

La relazione precedente, adottando una ponderazione rispetto agli angoli solidi (fattori di forma) anziché rispetto alle superfici (come avviene per altri modelli), ha il pregio di poter calcolare la temperatura media radiante di un punto qualsiasi all'interno della stanza.

[59] Ad esempio, nel caso di Milano (zona E) l'art. 9 del Decreto impone un tetto massimo di 14 ore giornaliere di accensione dell'impianto, dal 15 ottobre al 15 aprile.
[60] Questo è un tipico caso di limite da concordare col cliente durante la fase di "briefing" dell'intervento.
[61] Temperatura operante (UNI EN ISO 7730:1997): temperatura uniforme di una cavità nera in cui un soggetto scambierebbe la stessa quantità di energia termica per irraggiamento e convezione che scambia nell'ambiente reale non uniforme. Nella maggior parte dei casi pratici, quando la velocità relativa è bassa (< 0,2 m/s) o quando la differenza tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante è piccola (< 4 °C), la temperatura operativa può essere calcolata con sufficiente approssimazione come media aritmetica tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante.
[62] Temperatura media radiante (UNI EN ISO 7726:2002): temperatura uniforme di uno spazio immaginario in cui il trasferimento di calore radiante causato da un corpo umano uguaglia quello scambiato dallo stesso soggetto nell'ambiente reale non uniforme.
[63] Ricordiamo che il fattore di forma è funzione dell'angolo solido sotto il quale è vista una superficie (o una sua porzione) da un determinato punto; è espresso come percentuale dell'angolo solido globale corrispondente allo spazio circostante il punto, pertanto la sommatoria dei fattori di forma attinenti ad un qualsivoglia punto di un ambiente, relativi a ciascuna superficie isotermica risulta pari ad 1.

9.3 I limiti del PLM

Le potenzialità del metodo appena descritto sono enormi.
Innanzi tutto la sua applicabilità è pressoché totale, nel senso che l'utente ha a che fare con prestazioni ambientali e tecnologiche che frequentemente ricorrono nella pratica quotidiana. E' difatti poco credibile (e accettabile) che al giorno d'oggi un progettista non abbia idea di cosa rappresenti un diagramma di Glaser o che non si ponga il problema di garantire il controllo delle inerzie di una soluzione tecnica. Inoltre il metodo, avendo a che fare con le prestazioni ambientali di uno spazio costruito, è direttamente applicabile allo "spazio di progetto", e non ad un ambiente standard ("di riferimento", per intenderci) che andrà successivamente adattato in qualche modo alle peculiarità dell'intervento edilizio; in altre parole, i risultati forniti dal metodo sono direttamente fruibili in termini di Estimated Service Life, se con questo termine indichiamo la vita utile di componenti edilizi "a sistema" e in ben determinate condizioni d'uso e di sollecitazione. Infine, la soggettività che caratterizza il Metodo Fattoriale in questo caso non è presente, giacché i risultati vengono restituiti a valle di algoritmi di calcolo generalmente normati; quand'anche ciò non fosse possibile, ci si può sempre rifare a procedimenti comunemente adottati.
Tuttavia anche tale metodo presenta un limite, e purtroppo non da poco. Il lettore avrà potuto notare come si pervenga all'individuazione del limiti prestazionali in termini qualitativi; i limiti rappresentano valori che le caratteristiche funzionali non dovranno superare se vogliamo che le condizioni di comfort termo-igrometrico all'interno dell'ambiente siano ancora garantite. Il passaggio successivo, ovvero assegnare una connotazione temporale al limite prestazionale, richiede la disponibilità di quelle "curve di decadimento" delle caratteristiche funzionali che potranno essere ottenute solamente a seguito di indagini sperimentali. Ecco allora che l'applicazione del metodo presentato si configura come strettamente correlata alla diffusione di informazioni sul comportamento delle caratteristiche funzionali dei materiali nel tempo. Il grado di complessità del problema, se vogliamo, è stato ridotto, nel senso che il metodo consente di individuare la fine di vita utile di componenti edilizi complessi (come può essere ad esempio una chiusura verticale) a partire dalla conoscenza delle fenomeniche comportamentali dei singoli materiali costituenti i pacchetti tecnologici.
In questo senso sarebbe auspicabile che gli stessi produttori di componenti, oltre a svolgere prove relative alla valutazione della qualità tecnologica caratteristica (ovvero al "tempo zero") sui loro prodotti, compissero anche test di invecchiamento volti a fornire indicazioni in merito alla capacità di soddisfare i requisiti nel tempo.
La **figura 9.5** mostra come questo aspetto della qualità tecnologica sia in realtà molto più importante del precedente:

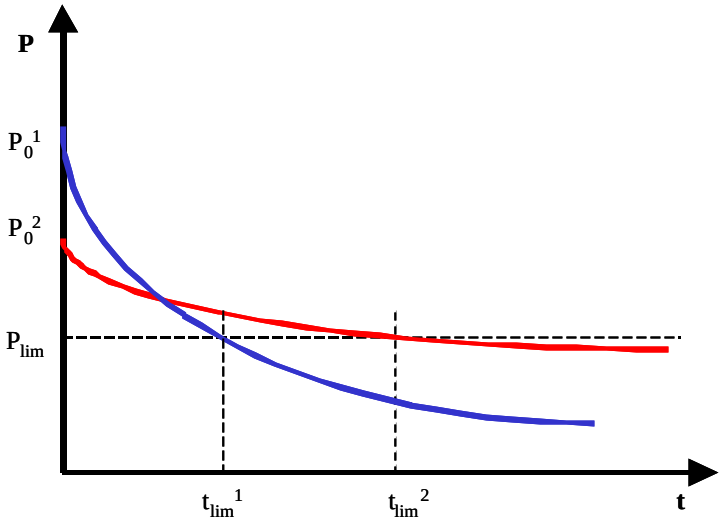

Fig. 9.5 – Qualità iniziale e nel tempo dei componenti edilizi

Indagini sperimentali potrebbero mettere in luce come il componente numero 1 (rappresentato nel grafico dalla linea blu), pur partendo da un livello prestazionale superiore (e vantando quindi una migliore qualità tecnologica caratteristica), manifesti evidenti segni di decadimento prestazionale nel tempo, che lo porteranno in tempi relativamente rapidi ad una "morte prestazionale". Al contrario, l'elemento numero 2 (linea rossa) si rivelerebbe più performante nel tempo grazie ad un passaggio meno brusco dalla condizione di funzionamento a quella di non-funzionamento individuata dal valore critico P_{lim}.
Considerazioni del genere purtroppo ad oggi non sono ancora possibili, in un mercato che già ha difficoltà a recepire l'idea di indicare valori numericamente ben definiti per le caratteristiche dell'oggetto proposto, al posto di locuzioni del tipo "ottimo isolamento termico, elevata resistenza alla diffusione, …".
Spesso, infatti, ci riteniamo soddisfatti di fronte a documentazione tecnica di prodotto che non sia puro e semplice materiale pubblicitario, ma che fornisca anche qualche caratteristica da cui il progettista possa trarre utili informazioni nella scelta del prodotto più adeguato alle sue esigenze.

9.4 Come sfruttare il PLM – Esemplificazione di un caso di studio

Di fronte dunque alla carenza di tali informazioni, il PLM vede ridimensionate molte delle sue ambizioni originarie.
Ciononostante è forte la convinzione in chi scrive che il metodo dei limiti prestazionali possa fornire indicazioni estremamente utili in fase decisionale al progettista che si trovi di fronte ad un repertorio più o meno vasto di soluzioni tecniche.
Se è vero che il metodo non è in grado ancora di restituire indicazioni di tipo quantitativo a causa del disinteresse finora mostrato dal mercato edilizio in generale (e in verità anche dalla difficoltà di imbastire lunghi monitoraggi e verifiche sperimentali su parti o su interi organismi edilizi), resta comunque intatta la sua capacità di fornire indicazioni di natura comparativa tra elementi di una stessa classe, considerati fuori sistema e in un contesto sollecitante specifico.

Per fare questo bisognerà cominciare a ragionare sulla durata dei componenti edilizi in termini di **propensione alla durata**, ovvero in termini di una valutazione non sperimentale, bensì previsionale ("a tavolino") del comportamento nel tempo di un oggetto edilizio, indagandone la *probabilità di raggiungere un valore di vita utile più o meno elevato.*
Verranno introdotti due indicatori di propensione alla durata e sviluppati di volta in volta degli esempi numerici per mostrare quali e quante informazioni vengano restituite al progettista in seguito all'adozione di questo tipo di approccio. Tali informazioni saranno successivamente integrate con le informazioni provenienti dallo studio della propensione all'affidabilità (secondo il metodo già descritto in § 4.4) per avere un quadro completo degli aspetti durabilistici dell'elemento tecnico indagato.

9.5 Il primo indicatore di propensione alla durata

Dal momento che la metodologia esposta non si sostanzia nella restituzione di valori "assoluti" di durata e/o affidabilità, è necessario definire un campo di applicazione articolato in un repertorio più o meno vasto di elementi tecnici omogenei, ovvero appartenenti ad una stessa classe. Questo carattere del metodo peraltro non rappresenta un grosso limite, dal momento che riflette ciò che spesso accade durante le prime fasi del processo decisionale, quando ancora il progettista non ha definito la soluzione costruttiva "ufficiale", potendo scegliere tra più possibilità, in prima approssimazione tutte ugualmente valide.

9.5.1 Definizione di un repertorio di elementi tecnici omogenei

Ripercorriamo allora la stessa situazione che si potrebbe presentare al progettista nella pratica quotidiana; poniamo l'esempio di dover realizzare un intervento di edilizia residenziale e di poter scegliere tra due soluzioni costruttive, altrettanto valide e di uso comune sul nostro territorio nazionale. Le tipologie costruttive prevedono una muratura "faccia a vista" con blocchi porizzati di supporto ed isolante interposto (in seguito denominata **chiusura faccia a vista**) ed una parete pluristrato a cassetta, sempre con isolante interposto, e finitura continua su entrambi i lati (in seguito denominata **chiusura pluristrato**).
Le **tabelle 9.6 e 9.7** danno una sintetica descrizione delle due soluzioni tecniche.

ELEMENTO FUNZIONALE	SPESSORE (cm)
Intonaco civile interno	2
Blocchi porizzati tipo "poroton"	25
Pannelli in polistirene espanso estruso	6
Mattoni pieni tipo "paramano"	12

Tab. 9.6 – Chiusura faccia a vista

ELEMENTO FUNZIONALE	SPESSORE (cm)
Intonaco civile interno	1,5
Mattoni forati	8
Pannelli resinati in lana di vetro	4
Mattoni semipieni	12
Intonaco civile esterno	1,5

Tab. 9.7 – Chiusura pluristrato

9.5.2 Stima della qualità tecnologica caratteristica: prestazioni al "tempo zero"

Una delle prime informazioni che consente di avere il metodo dei limiti prestazionali è quella relativa alle condizioni iniziali. Per poter parlare di vita utile di un componente edilizio, ovvero di mantenimento nel tempo delle caratteristiche atte a garantire il soddisfacimento di determinate prestazioni, è necessario verificare che le suddette prestazioni siano garantite al "tempo zero" di messa in opera.
In questi termini, la qualità tecnologica caratteristica rappresenta la *condicio sine qua non* per poter parlare di qualità tecnologica utile.
Nel verificare il soddisfacimento del comfort termo-igrometrico all'inizio della vita utile dell'elemento tecnico, sarà possibile operare in tempo reale delle modifiche alla soluzione tecnica in esame.
Le **figure 9.8 e 9.9** mostrano il diagramma di Glaser per le due chiusure precedentemente definite.

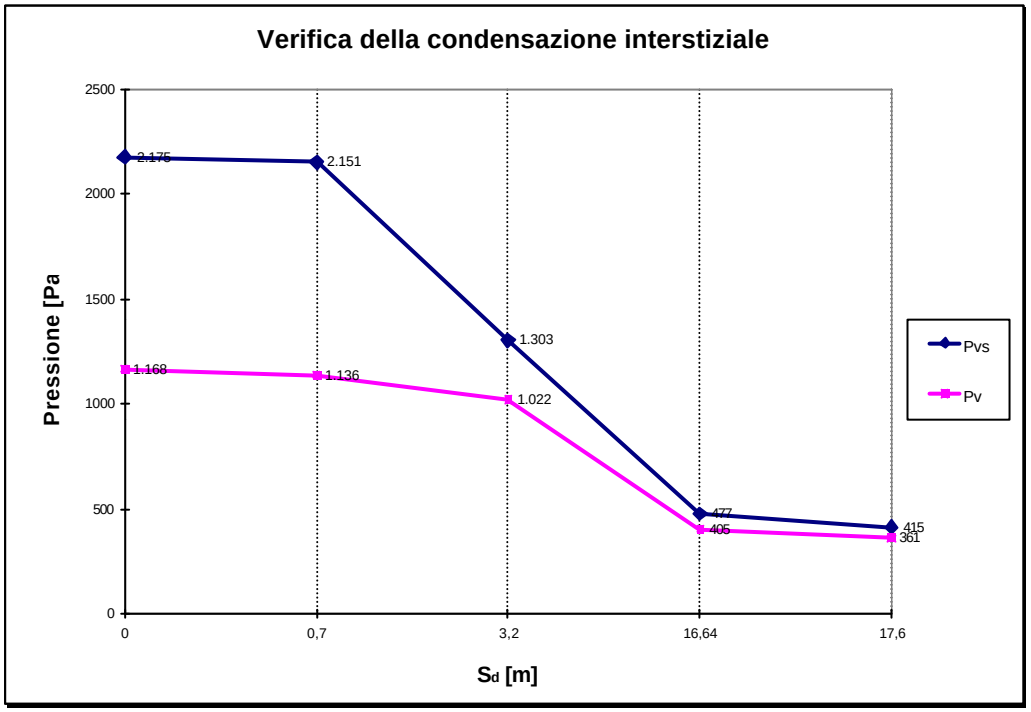

Fig. 9.8 – Diagramma di Glaser: chiusura faccia a vista

Preme in questa sede mettere in luce due aspetti fondamentali: il primo, come già accennato nel § 9.2.1, è che la norma contempla il fatto che la parete, durante le stagioni meno severe dal punto di vista climatico, sia in grado di smaltire l'eventuale condensa prodotta durante il periodo invernale, e che quindi il diagramma seguente non è di per sé sufficiente per affermare che la chiusura soffrirà effettivamente di problematiche legate a fenomeni di condensa interstiziale. Il secondo aspetto è che tali diagrammi sono stati ottenuti in condizioni particolarmente gravose, avendo adottato nei calcoli temperature minime di progetto (per Milano –5 °C) poco rispondenti alle reali condizioni di esercizio, soprattutto degli ultimi anni.

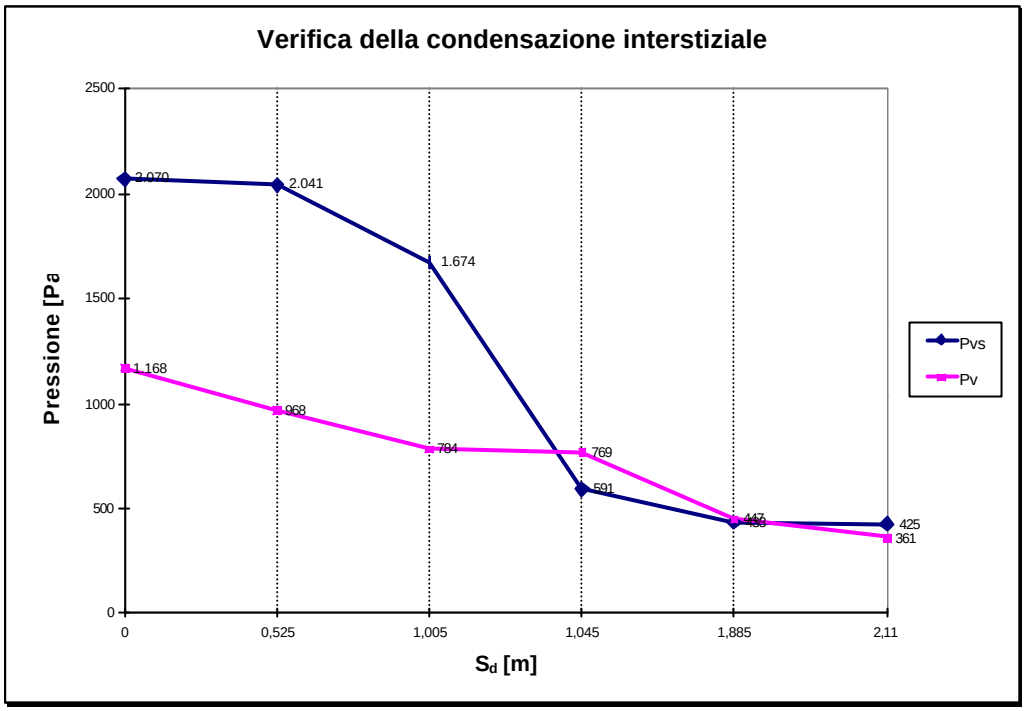

Fig. 9.9 – Diagramma di Glaser: chiusura pluristrato

In quest'ultimo caso, tuttavia, il progettista potrebbe scegliere un tipo di isolante differente per avere maggiori garanzie sul controllo della condensa interstiziale, adottando un polistirene simile a quello della prima soluzione tecnica (**figura 9.10)**.

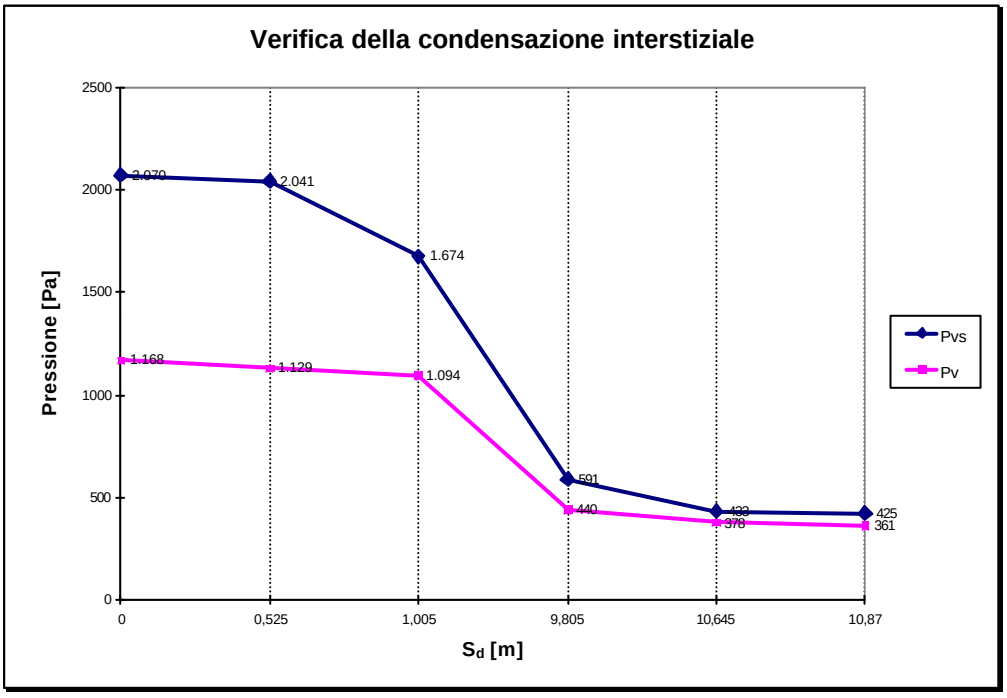

Fig. 9.10 – Diagramma di Glaser: chiusura pluristrato con isolante modificato

9.5.3 Il primo indicatore di propensione alla durata

Uno dei vantaggi di questo metodo può essere quindi quello di poter apprezzare i risultati di modifiche apportate ad una soluzione tecnica attraverso rappresentazioni che mostrano in tempo reale come variano le risposte prestazionali della stessa.
Ma i limiti prestazionali sono in grado di darci altre indicazioni; in termini di "propensione alla durata" sarà importante capire se verrà mai raggiunto un limite prestazionale.
Con la simbologia propria della **figura 9.11,** il *primo indicatore di propensione alla durata* può convenientemente essere rappresentato come funzione del valore iniziale e del valore di soglia.

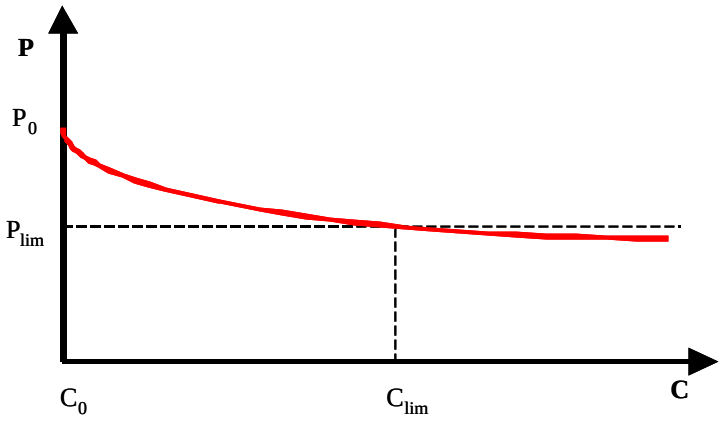

Fig. 9.11 – Valore iniziale e valore di soglia per la caratteristica funzionale "C"

La relazione seguente definisce il **primo indicatore di propensione alla durata I_1:**

$$I_1 = \frac{C_{lim}}{C_0}$$

A titolo puramente esplicativo viene trattato il caso relativo al controllo dei fenomeni di condensazione superficiale, per mostrare che tipo di considerazioni possano ricavarsi da questo tipo di approccio prestazionale.
Si confrontino a questo scopo le **figure 9.12 e 9.13**; si può notare come sia notevole la differenza di comportamento tra i due tipi di chiusura: mentre la muratura faccia a vista non sarà soggetta a fenomeni di condensa superficiale nemmeno a fronte di notevoli incrementi di conducibilità dei vari strati costituenti la parete stessa, la muratura pluristrato col tempo potrebbe richiedere degli interventi atti a riportare le prestazioni fornite ad un livello accettabile.
Come si può notare, la "soglia prestazionale" (la temperatura minima superficiale) è la stessa, dipendendo dalle condizioni ambientali (nello specifico è funzione esclusivamente della temperatura interna), ma a mutare sono le prestazioni iniziali.

Nel calcolo della temperatura superficiale interna, difatti, entra in gioco anche la resistenza termica della parete, che nel secondo caso risulta notevolmente inferiore a quella della chiusura faccia a vista, la quale può contare sull'apporto non indifferente dei blocchi in laterizio porizzato.
In simboli:

$$\vartheta_{si}^{\lim} = f(T_i)$$

$$\vartheta_{si} = f(\Delta T, \alpha_i, K_p)$$

dove:

- T_i = temperatura interna;
- ΔT = differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno;
- α_i = coefficiente liminare interno (secondo UNI 7357);
- K_p = termotrasmittanza della parete.

Poiché i primi tre parametri (T_i, ΔT, α_i) nel nostro caso possono ritenersi costanti, le condizioni iniziali varieranno in funzione della trasmittanza; la chiusura faccia a vista, potendo vantare una K_p = 0,323 W/m^{2}K partirà da una temperatura superficiale interna al tempo zero pari a ϑ_{si} = 18,85 °C, rispetto a ϑ_{si} = 18,06 °C della chiusura pluristrato (K_p = 0,544 W/m^{2}K).
La brusca caduta prestazionale ci dice che un contributo significativo è svolto dall'isolante. Ciononostante, una prima analisi tesa ad evidenziare il "peso" di questo elemento funzionale all'interno delle due soluzioni tecniche non sembrerebbe confortare le considerazioni appena svolte.

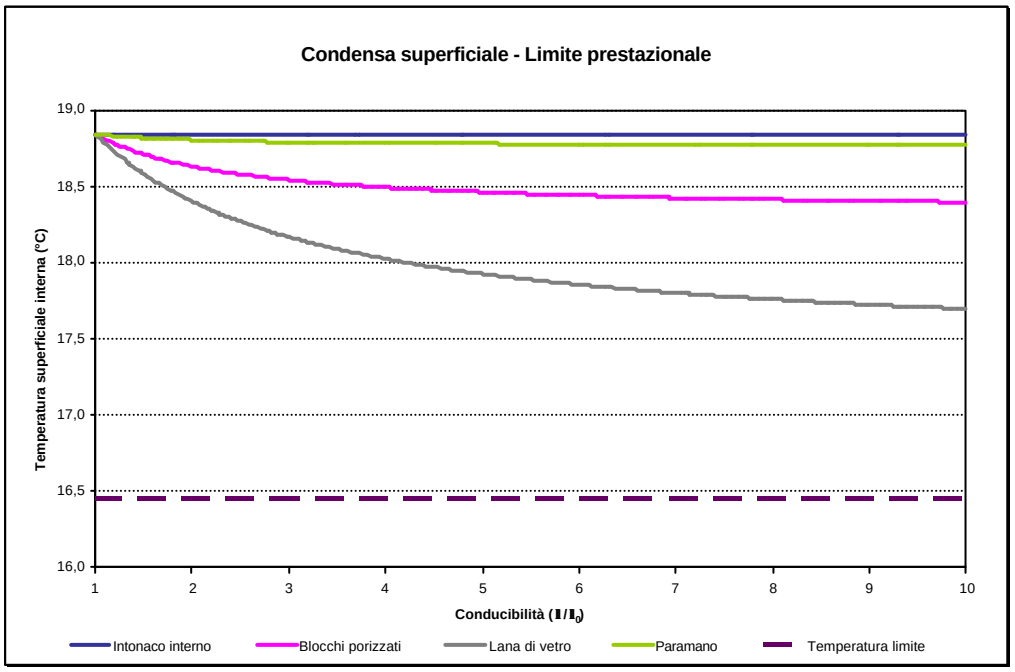

Fig. 9.12 – Condensa superficiale: chiusura faccia a vista

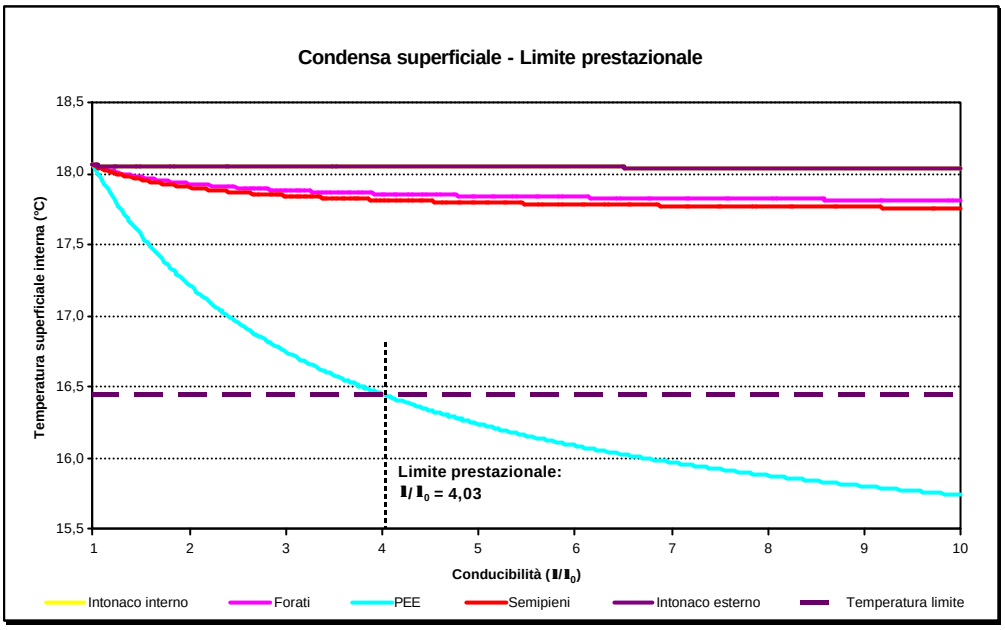

Fig. 9.13 – Condensa superficiale: chiusura pluristrato

Le **figure 9.14 e 9.15** mostrano i singoli contributi alla resistenza termica totale della chiusura; si può notare come "l'affaticamento" dell'isolante nei due casi sia molto simile (59% nel caso della faccia a vista, contro il 67% nel caso del pluristrato).

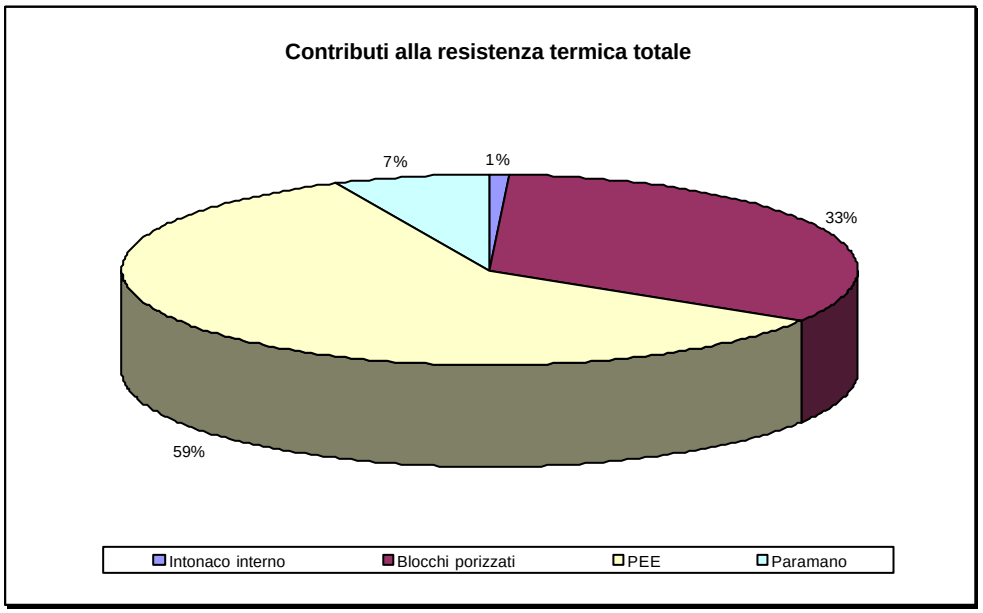

Fig. 9.14 – Chiusura faccia a vista: contributi alla resistenza termica totale

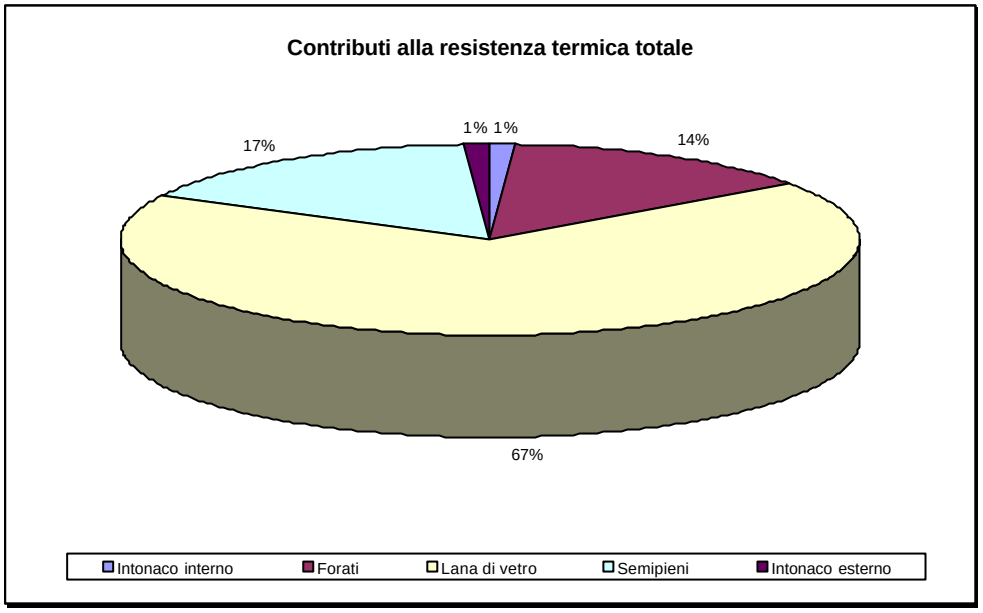

Fig 9.15 – Chiusura pluristrato: contributi alla resistenza termica totale

Anche una successiva analisi di sensitività ha confermato la sostanziale identità comportamentale dei due componenti edilizi. Le **figure 9.16 e 9.17** mostrano gli scostamenti (in termini percentuali) dal valore iniziale di termotrasmittanza a fronte di incrementi del 20%, 50% e 100% della conducibilità λ dei singoli strati.

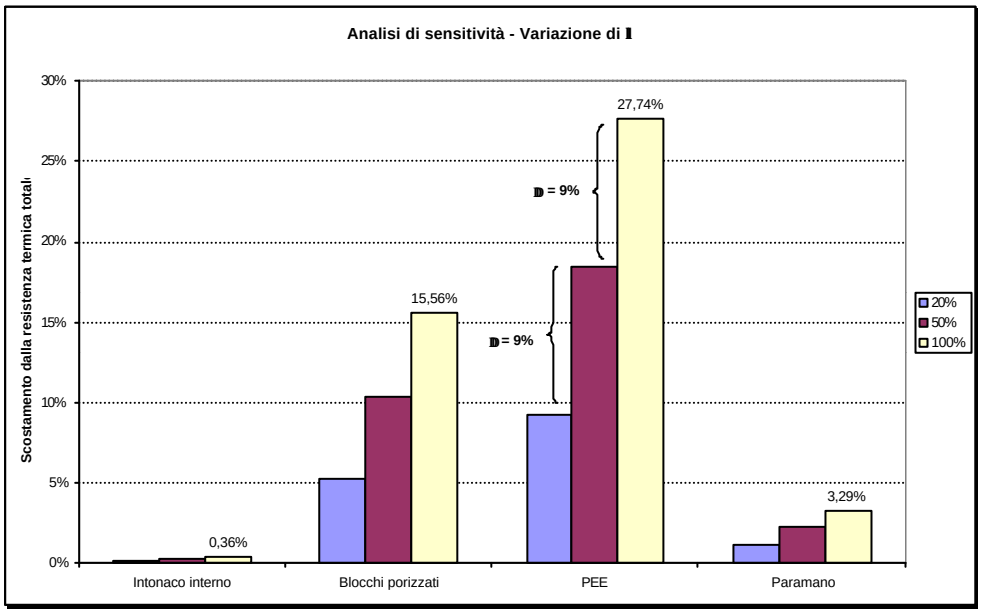

Fig. 9.16 – Chiusura faccia a vista: analisi di sensitività

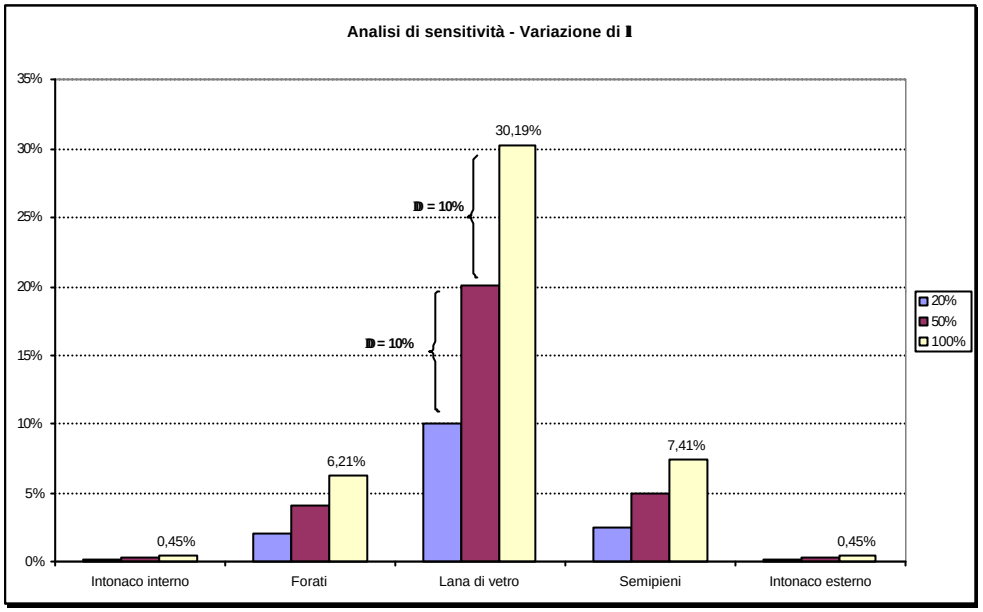

Fig. 9.17 – Chiusura pluristrato: analisi di sensitività

Ricapitoliamo dunque le informazioni che fino ad ora il metodo ci ha fornito: innanzitutto ci troviamo di fronte a due chiusure caratterizzate da una diversa propensione alla durata, dal momento che solo una delle due raggiunge il limite prestazionale (individuato in un rapporto $\lambda/\lambda_0 = 4{,}03$).
La condizione delle due differisce per due ordini di motivi: il primo riguarda la qualità caratteristica (soddisfacimento di prestazioni al tempo zero), e dipende esclusivamente dalla termotrasmittanza della parete.
Il secondo riguarda la qualità utile (soddisfacimento di prestazioni nel tempo), e riguarda il gradiente col quale il requisito ambientale (individuato nella temperatura superficiale interna dell'ambiente considerato) viene influenzato da variazioni delle caratteristiche funzionali indagate (nella fattispecie, la conducibilità).
Successive analisi condotte sul "carico termico" dell'isolante e sulla sensibilità della chiusura a variazioni di conducibilità mostrano tuttavia che il comportamento dei due oggetti edilizi è molto simile.
Ciò che a prima vista sembrerebbe una contraddizione in realtà appare più intuitivo se si pensa alla relazione che lega la temperatura superficiale interna alla trasmittanza:

$$J_{si} = T_i - \frac{K_T}{a_i}\Delta T = T_i - \Phi K_T \qquad (2)$$

In un piano (K_T, J_{si}) la (2) rappresenta una retta il cui coefficiente angolare è dato dalle condizioni di progetto, e che funge da "fattore di amplificazione"; in altre parole, a fronte di piccoli incrementi di K_T, la caduta di J_{si} è rilevante.
Questo fenomeno è tanto più accentuato quanto maggiore risulta la pendenza della retta.

La **figura 9.18** mostra la variazione del "fattore di amplificazione" per ΔT rispettivamente pari a 25 °C (tipico di interventi a Milano), 30 °C (Cuneo) e 35 °C (Bolzano)[64].

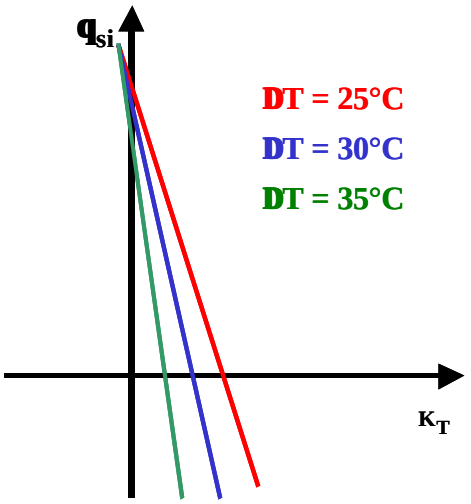

Fig. 9.18 – Variazione del fattore di amplificazione in relazione a diversi contesti climatici

Il fattore Φ fa sì che il passaggio di λ/λ_0 da 1 (condizione di progetto) a 2 comporti un $\Delta J_{si} = 0{,}45$ °C nel caso della chiusura faccia a vista, mentre un'amplificazione pari al doppio ($\Delta J_{si} = 0{,}84$ °C) nel caso della chiusura pluristrato.
Al contrario, per ΔT sempre più bassi il peso del degrado delle caratteristiche funzionali si traduce in un effetto più trascurabile (per lo meno su questo tipo di requisito).
La condizione limite è data da ΔT = 0 °C, in cui la retta assume inclinazione nulla e la temperatura superficiale interna non è più funzione della trasmittanza della parete: si tratta infatti della condizione di equilibrio termico tra interno ed esterno, in cui la chiusura perde la sua connotazione di elemento volto a separare gli spazi dell'ambiente interno rispetto all'esterno.
A scopo illustrativo (**figure 9.19, 9.20, 9.21 e 9.22**) viene mostrato come varia la risposta prestazionale nel tempo al variare del carico ambientale esterno, per esempio nel caso delle altre due località sopra menzionate, per le quali si hanno valori di progetto di ΔT = 30 °C e ΔT = 35 °C.

Le curve di correlazione "trasmittanza termica – temperatura superficiale interna" nei tre casi sono le seguenti:

- $J_{si} = 20 - 3{,}57 K_T$ nel caso di ΔT = 25 °C;
- $J_{si} = 20 - 4{,}29 K_T$ nel caso di ΔT = 30 °C;
- $J_{si} = 20 - 5{,}00 K_T$ nel caso di ΔT = 35 °C.

[64] I valori delle temperature minime esterne di progetto sono tratti dalla UNI 5364

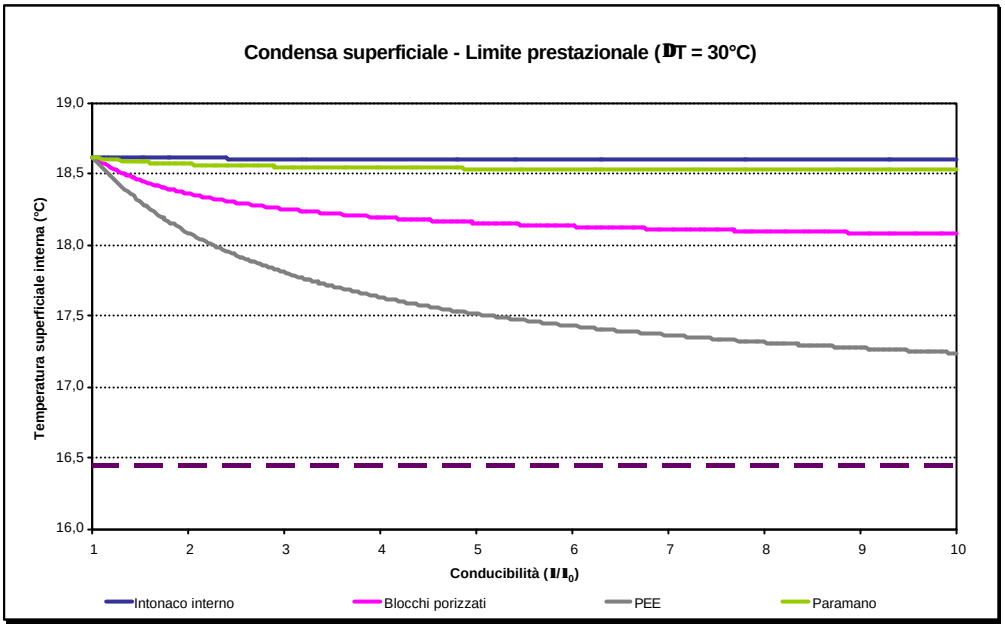

Fig. 9.19 - Condensa superficiale: chiusura faccia a vista (ΔT = 30 °C)

Le considerazioni appena fatte chiariscono l'importanza delle condizioni al contorno nelle scelte progettuali e sono state messe in luce grazie all'analisi (seppur per certi versi qualitativa) della mutazione delle prestazioni ambientali nel tempo.

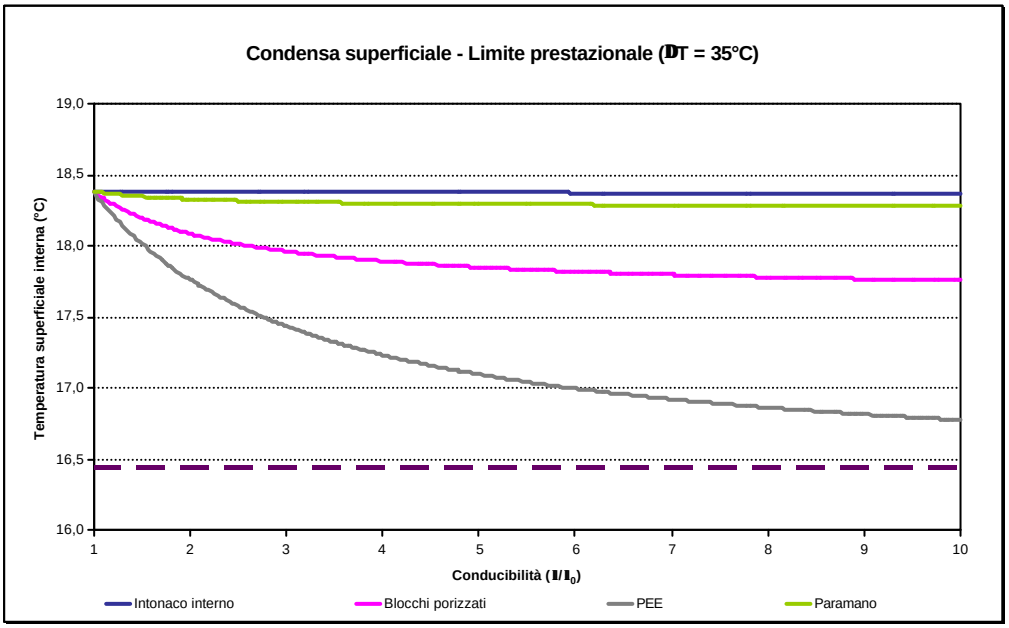

Fig. 9.20 - Condensa superficiale: chiusura faccia a vista (ΔT = 35 °C)

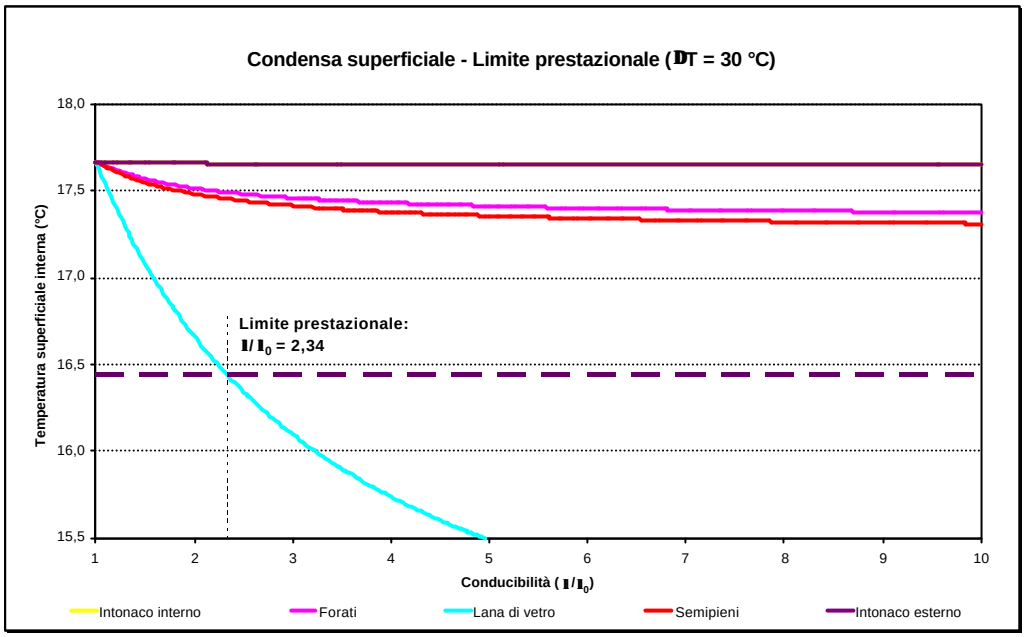

Fig. 9.21 - Condensa superficiale: chiusura pluristrato (ΔT = 30 °C)

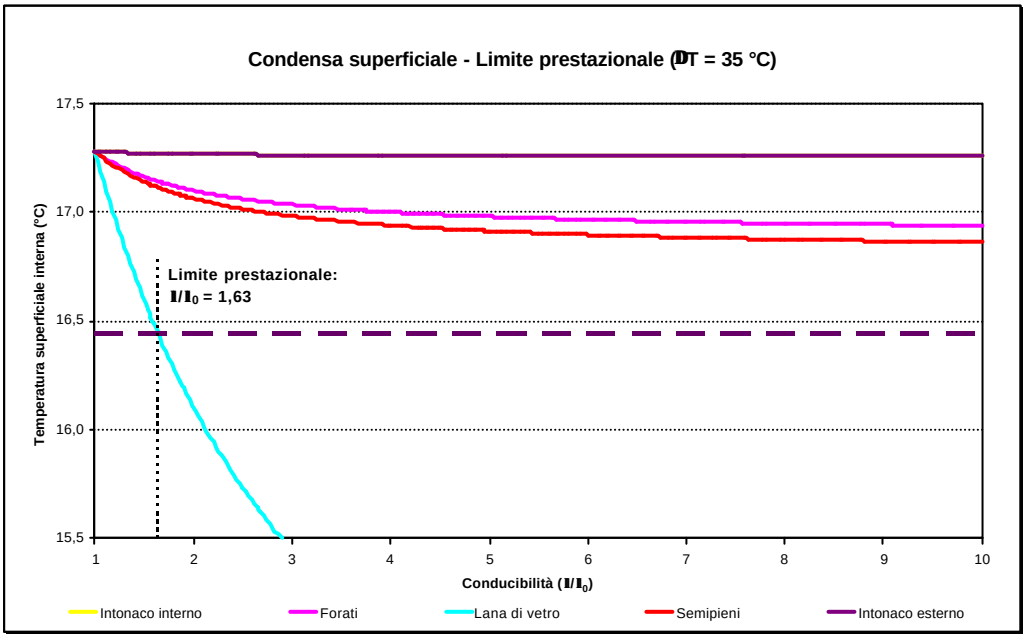

Fig. 9.22 - Condensa superficiale: chiusura pluristrato (ΔT = 35 °C)

I risultati delle analisi mostrati in queste pagine consentono dunque di trarre le seguenti indicazioni:

- Nella determinazione delle prestazioni iniziali ("al tempo zero") un ruolo fondamentale è giocato dalla trasmittanza della chiusura;

- Nella valutazione della caduta prestazionale nel tempo vanno considerati anche altri parametri; in particolare, pur di fronte a soluzioni tecniche che mostrano un simile grado di distribuzione e di affaticamento funzionale, è possibile risalire a comportamenti notevolmente differenti; in sostanza, componenti edilizi molto simili non è detto che degradino nel tempo con la stessa intensità. Questo perché esiste un fattore di amplificazione capace di associare forti cadute prestazionali a lievi variazioni delle caratteristiche funzionali. Questo fenomeno sarà tanto più rilevante quanto più l'intervento avverrà in zone climatiche caratterizzate da elevate differenze termiche tra ambiente interno ed esterno.

9.6 Il secondo indicatore di propensione alla durata

L'analisi della variazione delle prestazioni nel tempo consente di individuare (attraverso i limiti prestazionali) quale soluzione tecnica sia più idonea nel far fronte al soddisfacimento di particolari requisiti.
Questo è un risultato che consente al progettista di compiere una prima selezione tra le possibili ipotesi costruttive. Ma se gli studi di cui sopra dovessero evidenziare limiti prestazionali simili, si potrebbe fare qualche ulteriore considerazione?
Per rispondere a questa domanda è importante ricordare il procedimento che porta alla determinazione dei limiti prestazionali: tali soglie vengono individuate facendo variare di volta in volta le caratteristiche funzionali degli elementi costituenti l'elemento tecnico, che evidentemente risente in modo più o meno marcato del degrado dei materiali che lo compongono.
Va tuttavia osservato che nella realtà le cose funzionano diversamente, essendo il degrado la manifestazione di un invecchiamento naturale che colpisce *contemporaneamente* tutto il pacchetto. E' lecito supporre, dunque, che i limiti prestazionali individuati col procedimento utilizzato siano delle soglie "ideali", che nella realtà corrispondono a valori necessariamente più bassi, per quanto detto precedentemente.

9.6.1 I contributi secondari

In altri termini, la fine di vita utile restituita dal PLM andrebbe abbattuta con dei fattori correttivi in grado di tenere conto del degrado "generale" della soluzione tecnica.
D'altronde, il procedimento che porta all'individuazione dei limiti prestazionali, oltre ad essere particolarmente semplice, è anche ad oggi l'unico possibile; la mancanza di "curve di decadimento" associate ai differenti elementi costituenti l'oggetto edilizio, non consente infatti di stabilire una corrispondenza temporale tra i decadimenti di più strati.
La seguente **figura 9.23** illustra più chiaramente questo concetto: al tempo t*, il componente 1 (curva rossa) ha subìto un decadimento che ha portato una sua caratteristica funzionale nella condizione "A"; non siamo in grado però di sapere se nello stesso istante il componente 2 (curva blu) si troverà nella condizione B1 (linea continua), B2 (linea tratto-punto) o B3 (linea punteggiata).

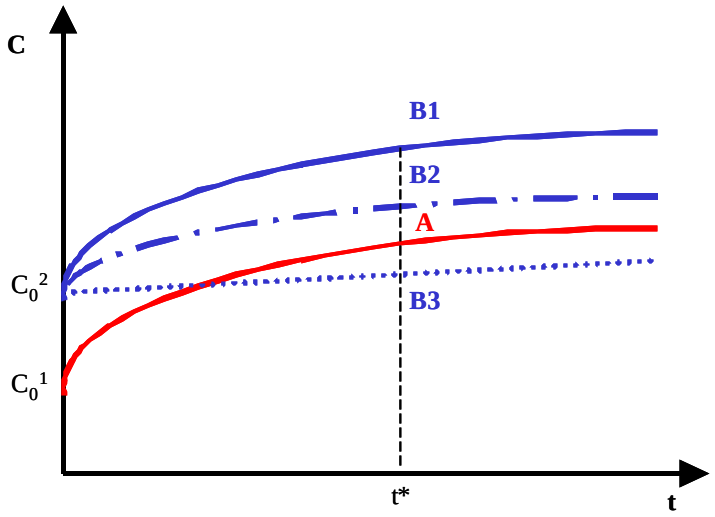

Fig. 9.23 – Il problema della corrispondenza temporale dei degradi

Una prima indicazione può essere data da un calcolo del limite prestazionale (sempre nel caso del controllo della condensa superficiale) svolto adottando la seguente ipotesi semplificativa:

$$\left(\frac{c}{c_0}\right)_i = \left(\frac{c}{c_0}\right)_j \qquad \forall t$$

dove:

- c = Valore di una caratteristica funzionale al tempo generico t*;
- c_0 = Valore della stessa caratteristica funzionale al tempo zero di messa in opera;
- c/c_0 = Indice del degrado dell'elemento funzionale;
- i, j = Generici strati funzionali appartenenti alla soluzione tecnica.

Attraverso questa ipotesi (peraltro molto forte) si lega il degrado di un elemento funzionale a quello degli altri, adottando un'unica curva di decadimento.
Pur consapevoli che un'ipotesi del genere non si presti a rappresentare il comportamento degli elementi tecnici nella realtà, può essere utile avere una stima dell'errore commesso nel trascurare i contributi concomitanti di più strati.
La **figura 9.24** mostra lo scostamento riscontrato nel calcolare il limite prestazionale adottando le due diversi ipotesi: la curva rossa è la stessa che compare nella figura 9.13 (dunque relativa alla chiusura pluristrato), e rappresenta il limite raggiunto facendo variare solamente la conducibilità dell'isolante, mentre la curva blu rappresenta la fine di vita utile raggiunta supponendo che tutti gli strati contribuiscano con la legge definita dalla relazione precedente.

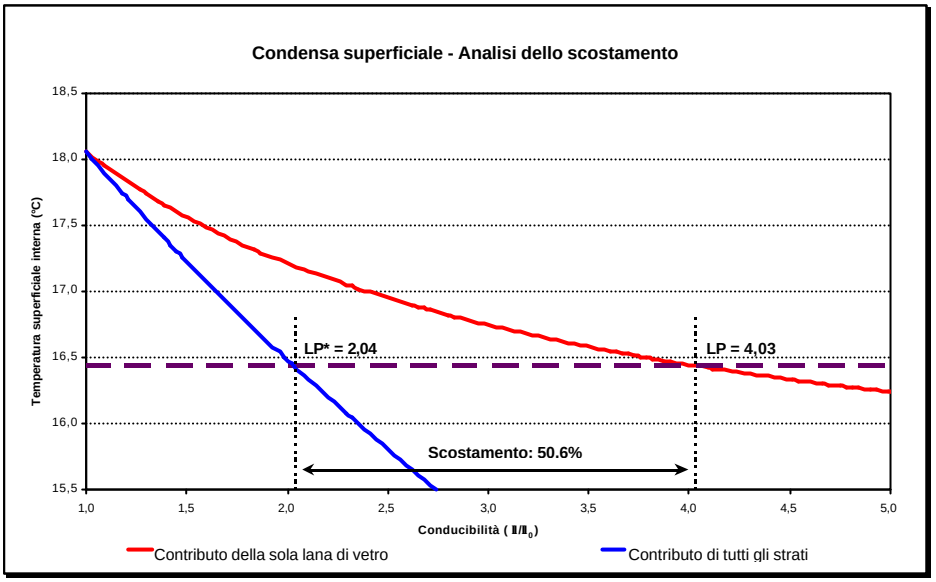

Fig. 9.24 – Analisi degli scostamenti: stima del contributo complessivo di tutti gli strati

Lo scostamento calcolato, in termini percentuali, è notevole: 50,6%. Ciò significa una stima della vita utile pari alla metà di quella individuata "convenzionalmente".
Il problema quindi esiste e non dovrebbe essere trascurato: il contributo degli elementi funzionali "meno nobili" va tenuto in debita considerazione per evitare spiacevoli sorprese, soprattutto di fronte a comportamenti prestazionali molto simili e soglie di vita utile dello stesso ordine di grandezza.
Un *secondo indicatore di propensione alla durata* potrebbe allora mettere in evidenza questa situazione, una volta preso atto del fatto che il primo indicatore I_1 restituisce valori confrontabili.
L'indicatore I_2 è stato costruito in modo tale da essere sensibile agli scostamenti relativi ai singoli strati rispetto alla condizione iniziale. Detto indicatore dovrà anche tenere conto del numero di strati costituenti il pacchetto tecnologico, per evitare che pacchetti più complessi risultino erroneamente sfavoriti da un numero maggiore di contributi.

La relazione seguente definisce il **secondo indicatore di propensione alla durata I_2:**

$$I_2 = \frac{1}{n}\sum_1^n \frac{\Delta P_i}{\Delta P_{max}}$$

dove:

- ΔP_i = Contributo fornito da parte dell'i-esimo strato;
- ΔP_{max} = Contributo fornito da parte dello strato più influente;
- n = Numero di strati costituenti la soluzione tecnica.

La **figura 9.25** dovrebbe contribuire a comprendere meglio il significato delle quantità in gioco nella definizione del secondo indicatore di propensione alla durata.

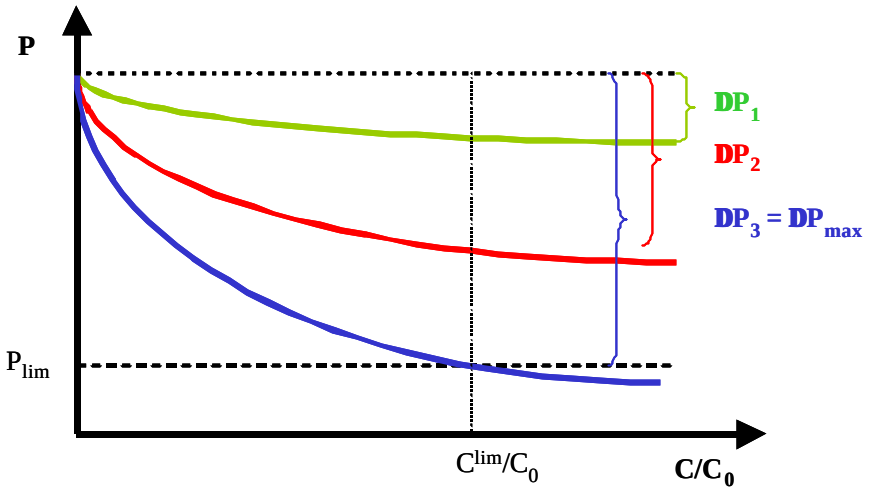

Fig. 9.25 – Contributi parziali e scostamenti dalla prestazione iniziale (al tempo zero)

Sempre relativamente alle due soluzioni costruttive scelte, si prendano ad esempio in considerazione i grafici relativi al requisito "isolamento termico".
Tale prestazione viene controllata attraverso la temperatura operante all'interno dell'ambiente; le **figure 9.26 e 9.27** mostrano che le due chiusure hanno limiti prestazionali molto simili ma, come detto, questi sono stati calcolati solo in base all'incremento di conducibilità dei due strati isolanti.

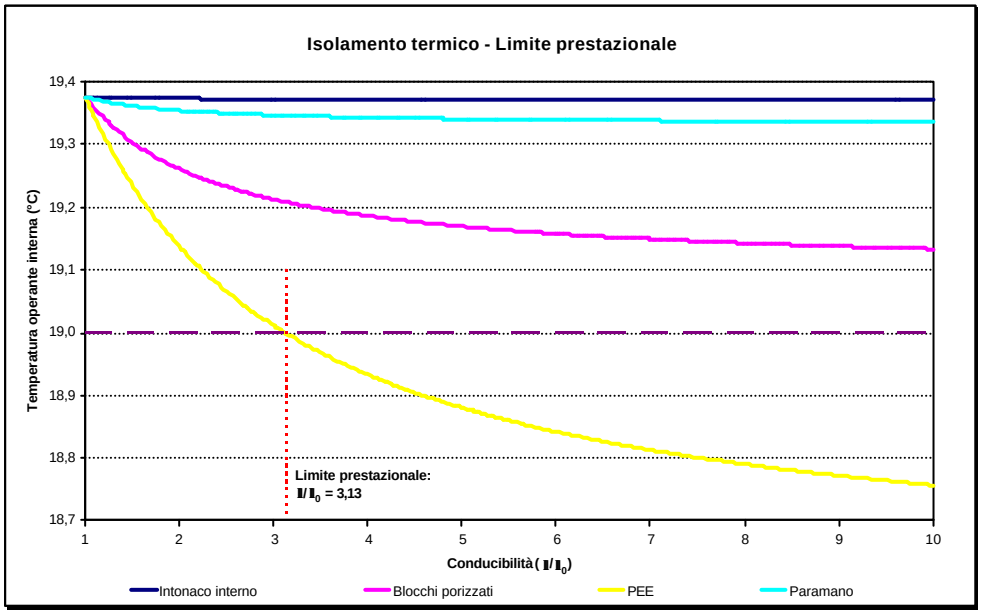

Fig. 9.26 – Isolamento termico: chiusura faccia a vista

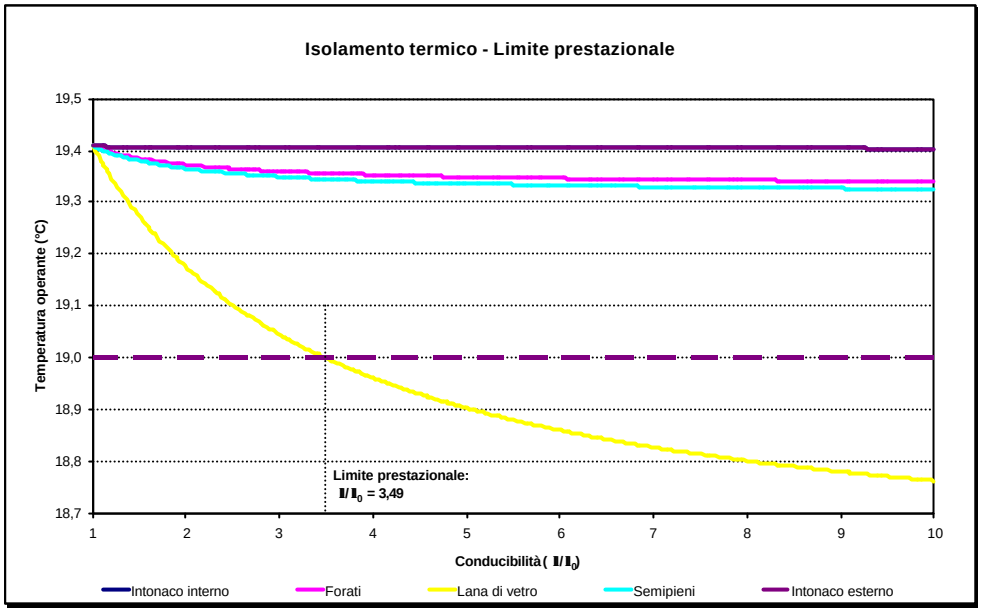

Fig. 9.27 – Isolamento termico: chiusura pluristrato

I grafici tuttavia mettono in evidenza un altro fatto; nel primo caso, difatti, il contributo relativo ai blocchi porizzati è comunque rilevante, e il rischio che essi mandino in crisi la soluzione tecnica prima di quanto possa avvenire nel caso della chiusura pluristrato è concreto.
I calcoli portano a valori di I_2 pari a 0,39 per la chiusura faccia a vista, mentre a valori pari a 0,26 nel caso della pluristrato.
Va ricordato anche in questo caso come la mancanza di curve di decadimento prestazionale ci obblighi a ragionare in termini approssimativi; per questo si è scelto di calcolare **convenzionalmente** l'indicatore I_2 in corrispondenza del limite prestazionale I_1.

Si possono adesso riassumere i risultati relativi alla stima di propensione alla durata delle due soluzioni tecniche, relativamente alla prestazione "isolamento termico":

Chiusura faccia a vista:

- $I_1 = 3,13$
- $I_2 = 0,39$

Chiusura pluristrato:

- $I_1 = 3,49$
- $I_2 = 0,26$

E' opportuno sottolineare che il calcolo del secondo indicatore di propensione alla durata I_2 ha senso solo nel caso di valori simili del primo indicatore I_1.
Il diagramma di flusso di **figura 9.28** indica il procedimento da seguire nella stima della propensione alla durata, nel caso di un repertorio limitato a due soluzioni tecniche. Il procedimento è facilmente estendibile al caso di un repertorio più vasto.

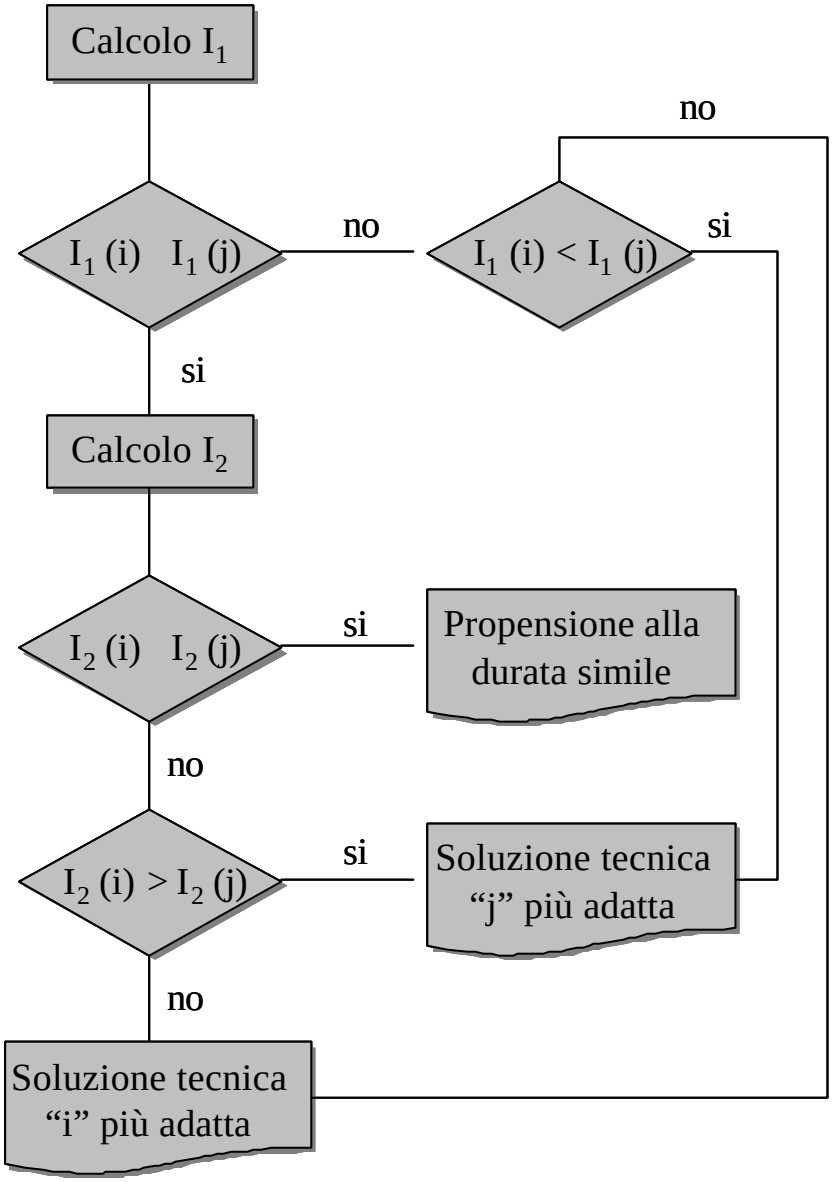

Fig. 9.28 – Metodologia proposta per la stima della propensione alla durata

9.7 La stima della propensione all'affidabilità

Al metodo di stima della propensione alla durata può essere affiancato il metodo già esposto in § 4.4 relativamente alla stima della propensione all'affidabilità.
Le indicazioni che si possono trarre dall'utilizzo di quest'ultimo, già di per sé importanti se utilizzate da sole, consentono di avere una visione più generale sulla durabilità dei componenti edilizi qualora affiancate al tipo di considerazioni fatte nei paragrafi precedenti.
Va subito chiarito come l'adozione di questo metodo ai fini della scelta di un componente edilizio per il suo impiego in un progetto di intervento specifico sia strettamente subordinata alla verifica di una sufficiente qualità tecnologica caratteristica (al tempo zero).

Più volte è stato evidenziato come abbia senso parlare di soddisfacimento delle prestazioni *nel tempo* solo se l'opera fin dall'inizio è in grado di soddisfare i requisiti (impliciti ed espliciti) per i quali è stata richiesta, progettata e realizzata.
Se detta componente della qualità tecnologica è garantita, è possibile allora indagare la probabilità di non accadimento di guasti del componente edilizio durante il suo periodo di vita utile. Anche in questo caso, pur non avendo ancora a disposizione un vero e proprio valore di fine di vita utile, è comunque possibile indagare la possibilità che l'elemento tecnico entri in crisi prima del dovuto, a causa di errori intervenuti in sede progettuale piuttosto che esecutiva.
La disciplina che più si avvicina allo studio di tali problematiche è quella della patologia edilizia, espressione di un invecchiamento accelerato causato da errori che possono essere stati compiuti da più parti e da più operatori del processo edilizio, siano essi progettisti, esecutori o semplici manutentori.
Sebbene in questa sede non si voglia entrare nel merito dello studio delle fenomeniche patologiche che portano all'insorgenza di guasti ed anomalie più o meno visibili, saranno comunque indagati i diversi aspetti dell'affidabilità, che forniranno al progettista un quadro piuttosto chiaro della probabilità che il componente si guasti prima di raggiungere il tempo di durata[65]. I risultati saranno rappresentati in termini di affidabilità relativa, evidenziando non tanto i valori assoluti del grado di propensione all'affidabilità, quanto le differenze tra i due pacchetti tecnologici.

9.7.1 Stima della propensione all'affidabilità funzionale

La prima componente indagata è quella relativa all'affidabilità funzionale; questa analisi, condotta sul modello funzionale, consente di determinare il grado di equilibrio nella distribuzione delle funzioni, ovvero l'intensità dell'affaticamento cui sono soggetti i diversi luoghi funzionali.

Partendo dalle soluzioni costruttive già analizzate, le **figure 9.29 e 9.30** mostrano i modelli funzionali complessivi, che costituiscono il punto di partenza per il calcolo dei nove criteri di giudizio suddivisi per tre aspetti principali:

- *A – Semplicità del modello*, espressa in termini di:
  - *Luoghi funzionali;*
  - *Funzioni analitiche;*
  - *Distribuzione delle funzioni;*

- *B – Affaticamento del modello*, espresso in termini di:
  - *Carico funzionale;*
  - *Variabilità del carico funzionale;*
  - *Carico critico;*
  - *Equilibrio del carico critico;*

- *C – Distribuzione funzionale del modello*, espressa in termini di:
  - *Connotazione in serie delle funzioni analitiche;*
  - *Connotazione in parallelo delle funzioni analitiche.*

[65] Per maggiori chiarimenti relativamente alla determinazione dei quattro aspetti dell'affidabilità vedere M.G. Rejna, *Valutazione della qualità tecnologica utile dei prodotti complessi per l'edilizia*. Quaderno n° 4 del DISET. Politecnico di Milano. Ed. Esculapio, Bologna, 1995

		LUOGHI FUNZIONALI			
		1	*2*	*3*	*4*
FUNZIONI BASE	*F1*	fg'.1	fg.1	fg.1	
	F2	ff.2	fc'.2	fc.2	
	F3		fc'.3 + fd'.3	fc.3	
	F4		fc'.4 + fd'.4	fc.4	
	F5		fm.5	fo.5	fm.5 + fp'.5
	F6		fc'.6	fc.6	
	F7		fr.7		
	F8			fu''.8	ft'.8

Tab. 9.29 – Chiusura faccia a vista: modello funzionale complessivo

		LUOGHI FUNZIONALI				
		1	*2*	*3*	*4*	*5*
FUNZIONI BASE	*F1*	fg'.1	fg'.1	fg'.1		
	F2	ff.2	fc'.2	fc.2	fc'.2	
	F3		fc'.3	fc.3	fc'.3	
	F4		fc'.4	fc.4	fc'.4	
	F5		fm'.5		fm.5	fp.5
	F6		fc'.6	fc.6	fc'.6	
	F7		fr.7			
	F8				ft'.8	ft'.8

Tab. 9.30 – Chiusura pluristrato: modello funzionale complessivo

La simbologia utilizzata è quella propria dell'analisi funzionale: la "F" indica le funzioni base, mentre la "f" rappresenta funzioni analitiche; l'apice (') è generalmente associato a funzioni analitiche di intensità minore per significatività e/o attivazione.

I nove criteri indagati sono i seguenti:

- *A_1 – Criterio della semplicità strutturale del modello;*
- *A_2 – Criterio della semplicità funzionale del modello;*
- *A_3 – Criterio della semplicità ubicazionale del modello;*
- *B_1 – Criterio dell'affaticamento medio del modello;*
- *B_2 – Criterio dell'affaticamento critico del modello;*
- *B_3 – Criterio della variabilità dell'affaticamento;*
- *B_4 – Criterio dell'equilibrio dell'affaticamento;*
- *C_1 – Criterio del grado di distribuzione in serie delle funzioni analitiche;*
- *C_2 – Criterio del grado di distribuzione in parallelo delle funzioni analitiche.*

La **tabella 9.31** mostra i risultati scaturiti dall'analisi condotta sui due modelli; dal momento che operando su un repertorio costituito da due soli elementi non avrebbe senso rappresentare i risultati ottenuti in scala 1÷5 (o in scala 1÷100), sono stati rappresentati i risultati attraverso altri strumenti che diano ugualmente una valida indicazione sul comportamento delle due chiusure.
Nella tabella non compare il criterio relativo alla *semplicità ubicazionale* (A_3) dal momento che non è stato soddisfatto da alcuno dei due modelli.

PROPENSIONE ALL'AFFIDABILITA' FUNZIONALE			
Aspetti funzionali	**Criteri**	**Chiusura faccia a vista**	**Chiusura pluristrato**
Semplicità	A_1	✓	
	A_2		✓
Affaticamento	B_1		✓
	B_2		✓
	B_3		✓
	B_4	✓	
Relazione	C_1		✓
	C_2		✓

Tab. 9.31 – Propensione all'affidabilità funzionale delle due chiusure

Il diagramma a torta di **figura 9.32** bene si addice a fornire una rappresentazione del grado di soddisfacimento dei criteri di giudizio relativi alla componente funzionale dell'affidabilità; è stato ottenuto in considerazione del fatto che degli otto criteri presenti nella tabella precedente, ben sei hanno visto prevalere la soluzione tecnica pluristrato sull'altra.

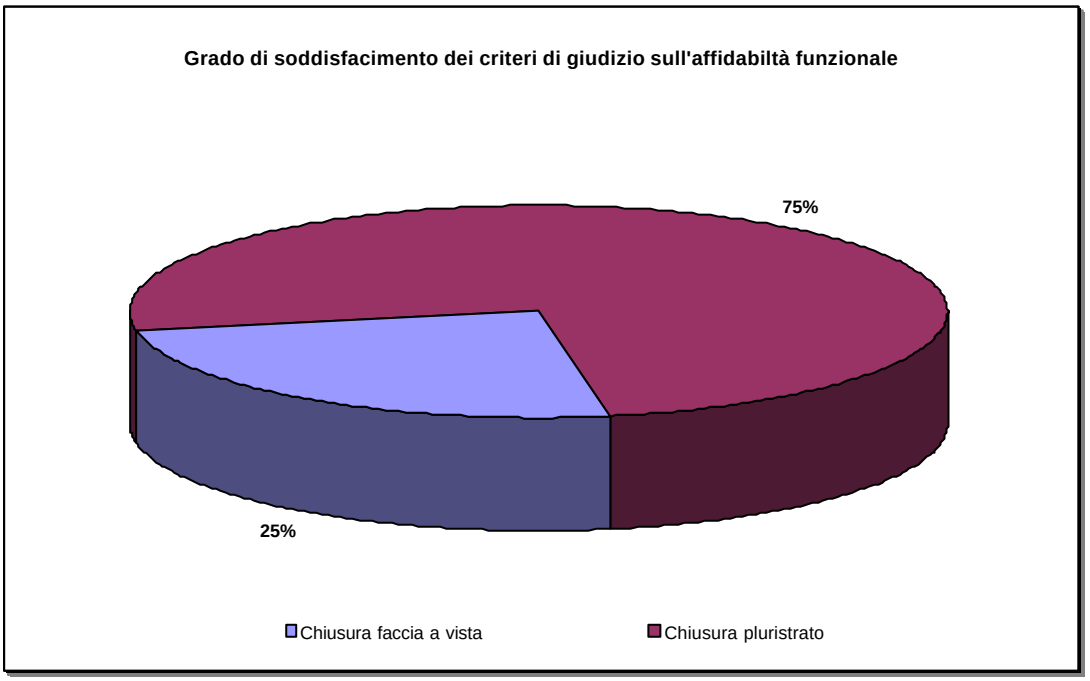

Fig. 9.32 – Propensione all'affidabilità funzionale delle due chiusure

La chiusura faccia a vista paga dunque la sua semplicità strutturale in termini sia di affaticamento che di distribuzione. La semplicità strutturale, che spesso si traduce anche in una migliore propensione affidabilità esecutiva (per lo meno nelle sue componenti merceologica ed oggettuale) rischia di venire penalizzata dal punto di visto di un maggior carico funzionale; si pensi, ad esempio, alla progettazione di soluzioni monostrato, per le quali l'estrema semplicità ne costituisce al contempo il limite più grande, concentrando gran parte delle funzioni richieste all'elemento tecnico su un solo strato, vettore fisico (attraverso le sue caratteristiche funzionali) che consente il passaggio dal modello funzionale a quello oggettuale.

9.7.2 Stima della propensione all'affidabilità esecutiva

La componente esecutiva dell'affidabilità rappresenta l'indice dell'imprecisione prevedibile nella fase esecutiva, e prende origine dal fatto che più aspetti determinano la rispondenza o meno dell'esecuzione dell'elemento alle intenzionalità del progetto.
Il numero di differenti merceologie, così come il numero degli elementi funzionali nonché la frequenza di interfacce, danno origine ad altrettante sottocomponenti di questo particolare aspetto affidabilistico.

I tre criteri indagati sono i seguenti:

- *AE_m – Criterio dell'affidabilità esecutiva merceologica;*
- *AE_o – Criterio dell'affidabilità esecutiva oggettuale;*
- *AE_r – Criterio dell'affidabilità esecutiva relazionale.*

In questo caso la comparazione è avvenuta valutando lo scostamento in termini percentuali tra le prestazioni delle due soluzioni tecniche. Indifferentemente possono essere prese pari all'unità valori di una o dell'altra, contando esclusivamente il "delta" tra le due.
La **figura 9.33** riassume i risultati delle analisi svolte: si tenga presente che, per come sono costruiti gli indici I_r, I_m e I_o, la soluzione più affidabile sarà quella caratterizzata dai valori *più bassi* di questi ultimi.

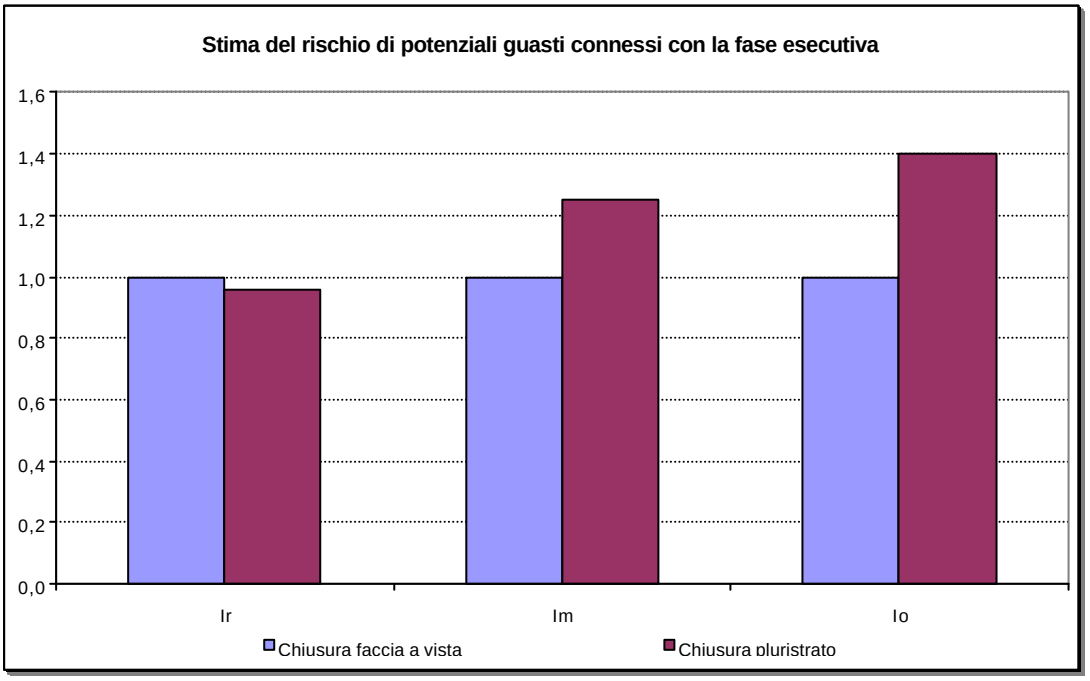

Fig. 9.33 – Stima del rischio di potenziali guasti connessi con la fase esecutiva

La chiusura faccia a vista prevale dunque in termini di affidabilità merceologica ed oggettuale, mentre si comporta leggermente peggio sull'aspetto relazionale.

Un aumento della componente merceologica di entrambe le soluzioni potrebbe essere ottenuto pensando ad un approvvigionamento di malte ed intonaci premiscelati anziché confezionati in

opera[66], mentre nel caso della chiusura faccia a vista, che prevede l'uso di blocchi porizzati, si potrebbe pensare a ridurre la complessità relazionale attraverso l'adozione di soli giunti orizzontali tra i blocchi porizzati (adottandone di maschiati, ad incastro).

9.7.3 Stima della propensione all'affidabilità inerente

La stima della propensione dell'affidabilità inerente mette in luce la presenza di potenziali variazioni dimensionali che potrebbero comportare rischi di precoce perdita di integrità funzionale dell'elemento stesso. La presenza di ginnastiche dimensionali non uniformi, dovute a differenti momenti di inerzia, moduli elastici e coefficienti di dilatazione, unitamente a particolari tipologie di solidarizzazione degli elementi costituenti la soluzione tecnica, impongono di analizzare due criteri di questo aspetto:

- *AI_t – Criterio dell'affidabilità inerente termica;*
- *AI_u – Criterio dell'affidabilità inerente umida;*

Come per gli aspetti precedenti, i risultati vengono esposti di seguito (**fig. 9.34**). Anche in questo caso, come in quello precedente, la soluzione tecnica più affidabile va ricercata tra quelle con valori più bassi dei sei indici considerati.

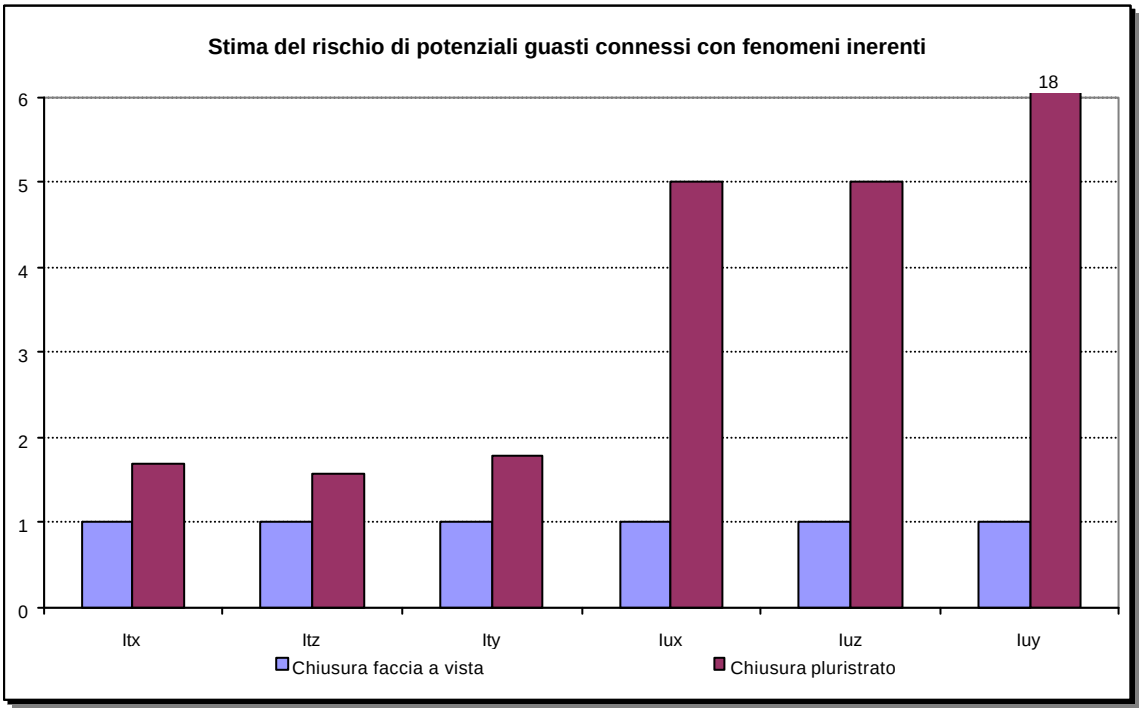

Fig. 9.34 – Stima del rischio di potenziali guasti connessi con fenomeni inerenti

Il maggiore rischio correlato all'insorgenza di ginnastiche dimensionali è evidente nella chiusura pluristrato. L'adozione di rivestimenti plastici a base acrilica caratterizzati da elevati coefficienti di dilatazione termica ($\alpha = 90*10^{-6}$ m/m°C) ed umida ($\beta = 0,01$) e la

[66] Evidentemente questa scelta non può prescindere da considerazioni di natura più prettamente ergotecnica, finalizzate ad analisi dei tempi e dei costi di approvvigionamento nonché ad una differente organizzazione del cantiere.

contemporanea scelta di un isolante sensibile all'umidità (lana di vetro, $\beta = 0{,}03$) comportano l'attivazione di notevoli sollecitazioni all'interno del pacchetto, soprattutto nella direzione coordinata "y" (spessore), dove tali materiali sono accostati ad altri dalle caratteristiche profondamente diverse. Anche in questo caso il progettista si trova di fronte ad indicazioni che possono meglio orientarlo verso una scelta più corretta.

9.7.4 Stima della propensione all'affidabilità critica

L'ultimo aspetto che può incidere sul rischio di precoce perdita di integrità funzionale attiene alle problematiche di incompatibilità chimico-fisiche, che potrebbero tradursi col tempo in mutazioni dell'integrità strutturale dei materiali costituenti il pacchetto tecnologico. Il numero e l'intensità delle incompatibilità tra tutte le tipologie d'interfaccia verranno studiati attraverso i seguenti criteri:

- *AC_c – Criterio dell'affidabilità critica chimica;*
- *AC_f – Criterio dell'affidabilità critica fisica;*

La **figura 9.35** consente di comparare le due soluzioni tecniche. La chiusura faccia a vista risulta essere la meno affidabile. In questo senso tale soluzione tecnica paga molto (dal punto di vista chimico) eventuali problemi che potrebbero scaturire dallo sviluppo di efflorescenze (che su mattoni a vista possono avere un forte impatto estetico), nonché dalla scelta di un collante non adatto, contenente resine epossidiche in grado di attaccare il polistirene, compromettendone così le capacità isolanti nel tempo. Per quel che invece riguarda incompatibilità di tipo fisico, va registrato un problema di traspirazione a causa del tipo di isolante adottato che, essendo a cellule chiuse, non consente un corretto passaggio del vapore (garantito invece dalla lana di vetro della chiusura pluristrato).

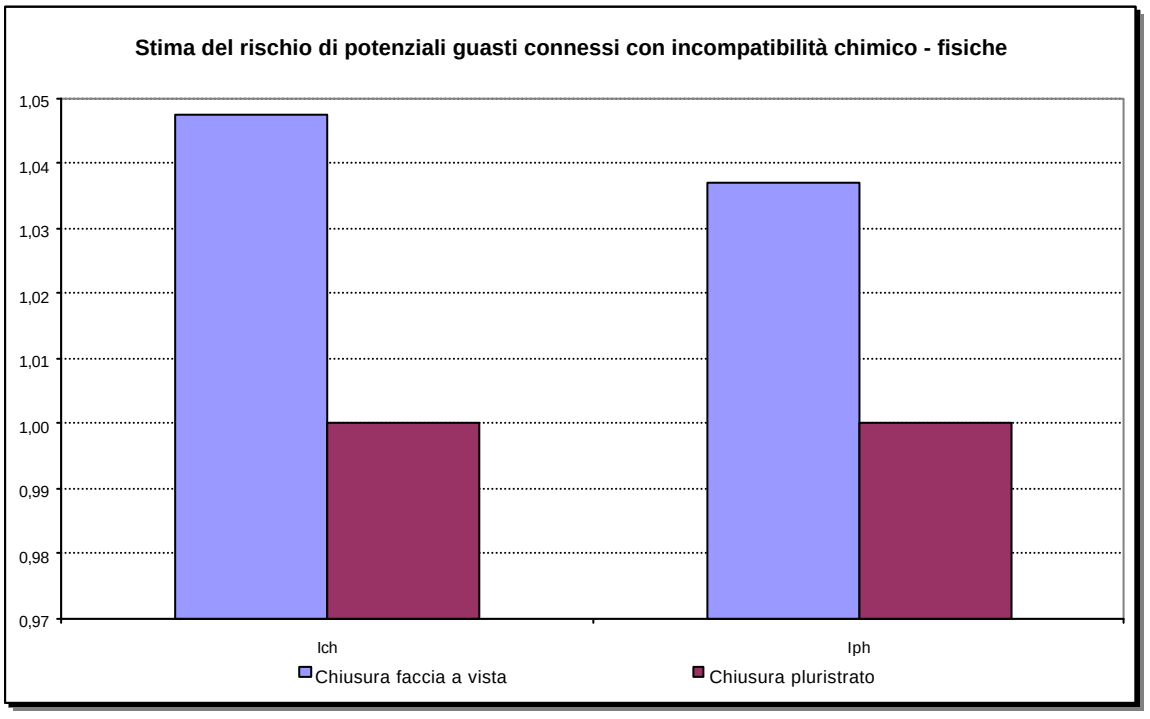

Fig. 9.35 – Stima del rischio di potenziali guasti connessi con incompatibilità chimico-fisiche

Anche in questo caso, tale analisi costituirà per il progettista un *feedback* di dati che potrebbero indurlo ad intervenire sul tipo di soluzione tecnica progettata o, più semplicemente, a porre una maggiore attenzione durante la fase esecutiva al fine di evitare l'insorgenza di possibili patologie.

9.8 Caso di studio – Sintesi dei risultati ottenuti

Al termine di questa disamina possiamo riassumere i risultati ottenuti dallo studio delle due chiusure. Una possibile, sintetica esposizione di quanto restituito dall'applicazione dei due metodi ai casi di studio compare nelle successive tabelle.
Se in un primo momento entrambe le soluzioni tecniche potevano essere considerate discrete scelte progettuali, già una prima analisi della qualità tecnologica caratteristica mostra come la chiusura pluristrato risulti carente per ciò che attiene al controllo della condensa interstiziale (**tab. 9.36**). I modelli di calcolo tuttavia evidenziano come sia sufficiente cambiare il tipo di isolante per avere una soluzione conforme sotto questo punto di vista.

FUNZIONE BASE	SPECIFICAZIONE DI PRESTAZIONE	SPECIFICA DI PRESTAZIONE (PLURISTRATO)	SPECIFICA DI PRESTAZIONE (FACCIA A VISTA)
F1	Glaser	NO	SI
F2	$t_{si} > 16{,}44$ °C	$t_{si} = 18{,}06$ °C	$t_{si} = 18{,}85$ °C
F4	T(17 °C) > 7 h	T(17 °C) = 8,2 h	T(17 °C) = 11,4 h
F6	$t_{op} > 19$ °C	$t_{op} = 19{,}44$ °C	$t_{op} = 19{,}38$ °C

Tab. 9.36 – Qualità tecnologica caratteristica (al tempo zero)

In ogni caso, indagini condotte in seguito attraverso l'adozione del PLM mostrano la sostanziale differenza tra i comportamenti dei due pacchetti (**tab. 9.37**); il vantaggio di lavorare con una muratura faccia a vista è reso manifesto dalle simulazioni di degrado per le funzioni base F2 (controllo della condensa superficiale) e F4 (controllo dell'inerzia termica in stagione invernale). Nel primo caso, addirittura, il limite prestazionale non viene raggiunto nemmeno per valori estremamente elevati di conducibilità (unica caratteristica funzionale coinvolta), tendendo la soluzione (attraverso tutti i suoi elementi funzionali) ad una stabilizzazione asintotica che non può che rassicurare sul grado di soddisfacimento della prestazione nel tempo.
Anche nel secondo caso, lo scostamento tra i due limiti prestazionali è estremamente elevato, spingendoci a prediligere la "faccia a vista" rispetto alla "pluristrato".
Nel caso del controllo dell'isolamento termico (funzione base F6), infine, il comportamento è pressoché analogo, anche se un'indagine condotta in seconda approssimazione (attraverso l'indicatore di propensione alla durata I_2) mette in luce un discreto contributo dei blocchi porizzati nel processo di decadimento prestazionale.

FUNZIONE BASE	PROPENSIONE ALLA DURATA (PLURISTRATO)	PROPENSIONE ALLA DURATA (FACCIA A VISTA)
F1	-	$I_1 = 0,94$
F2	$I_1 = 4,03$ ($I_2 = 0,26$)	Non raggiunto Non raggiunto
F4	$I_1 = 1,45$ ($I_2 = 0,36$)	$I_1 = 9,19$ ($I_2 = 1,81$)
F6	$I_1 = 3,49$ $I_2 = 0,26$	$I_1 = 3,13$ $I_2 = 0,39$

Tab. 9.37 – PLM: Qualità tecnologica utile (nel tempo)

Data la delicatezza con la quale vanno interpretati i risultati delle comparazioni, come più volte abbiamo detto, si rende necessaria anche una stima della propensione all'affidabilità, che ci fornisca considerazioni in merito a possibili rischi di non funzionamento causati da errori in fase progettuale e/o esecutiva dell'intervento.
La **tabella 9.38** mostra come sia effettivamente possibile adottare una chiusura faccia a vista (che possiede una *maggiore propensione alla durata*, intesa come *maggiore probabilità di raggiungere un tempo di vita utile superiore a quello dell'altro tipo di chiusura*) a patto di governare gli aspetti funzionali e, soprattutto, critici. Ricordiamo che su tali aspetti si può intervenire con particolari accorgimenti (alcuni dei quali sono stati proposti, volta per volta, nel paragrafo precedente) atti a ridurre il rischio di incappare in fenomeni patologici durante la vita utile dell'elemento tecnico.

ASPETTI AFFIDABILISTICI	PROPENSIONE ALL'AFFIDABILITA' (PLURISTRATO)	PROPENSIONE ALL'AFFIDABILITA' (FACCIA A VISTA)
Affidabilità funzionale	75% (6/8)	25% (2/8)
Affidabilità esecutiva	33% (1/3)	67% (2/3)
Affidabilità inerente	0% (0/6)	100% (6/6)
Affidabilità critica	100% (2/2)	0% (0/2)

Tab. 9.38 – Stima della propensione all'affidabilità: grado di soddisfacimento dei 4 aspetti

9.9 Complementarietà ed interrelazioni tra i due metodi

Il quadro che si va delineando dai ragionamenti condotti nel corso del presente capitolo appare come complesso e variegato; si è cercato di mettere in luce, attraverso una serie di esempi mirati, come anche in assenza di valori numerici ben precisi sia possibile trarre considerazioni di natura durabilistica dal confronto di più elementi tecnici, in un'ottica di propensione della durabilità finalizzata ad un'ottimizzazione della scelta progettuale; nel primo caso (attraverso il metodo dei limiti prestazionali) si indaga la possibilità di raggiungere il limite prestazionale in tempi più o meno rapidi, mentre nel secondo caso (con il metodo di stima della propensione all'affidabilità) si stima la probabilità che la vita utile (qualunque essa sia) della soluzione tecnica venga meno precocemente, a causa di errori di natura progettuale e/o esecutiva.
I due metodi peraltro non andranno considerati a se stanti, ma applicati in un'ottica di complementarietà tesa a colmare l'uno le lacune dell'altro; voler adottare PLM per comparare diversi elementi tecnici può rivelarsi difatti molto pericoloso in assenza di un ampio quadro informativo.
In questi termini il diagramma di flusso di fig. 9.28 va letto con spirito critico; la "soluzione più adatta" è il risultato di quanto scaturito dall'applicazione del solo PLM, condotta su soluzioni tecniche tecnologicamente e merceologicamente differenti. Spetterà alla sensibilità del progettista poi sviluppare ulteriori considerazioni anche alla luce del secondo metodo indagato. Dunque, i risultati forniti dal PLM andranno sempre interpretati, tenendo conto che la loro capacità previsionale sarà tanto più aderente alla realtà quanto più simili saranno i casi di studio, in termini di soluzioni costruttive adottate, di merceologia dei materiali costituenti i pacchetti tecnologici, di sensibilità agli agenti sollecitanti, …

Di seguito vengono riportati alcuni esempi che cercheranno di chiarire in che modo si possano utilizzare correttamente i due metodi.

- **Esempio n° 1** – Supponiamo di trovarci di fronte ad una caduta prestazionale come quella rappresentata in **figura 9.39**. La parete indagata è una chiusura monostrato, che presumibilmente attribuirà gran parte dei compiti prestazionali all'elemento principale (rappresentato nell'esempio dalla curva blu). Pur non essendo di fronte al raggiungimento di un limite prestazionale, sarà importante compiere un'analisi volta ad evidenziare la componente funzionale dell'affidabilità.
  Il grado di affaticamento cui sarà soggetto l'elemento tecnico principale rischia di compromettere prima del tempo le sue capacità prestazionali, così come una scorretta distribuzione in parallelo delle funzioni analitiche potrebbe far coincidere una carenza dello strato con l'entrata in crisi dell'intero pacchetto tecnologico.

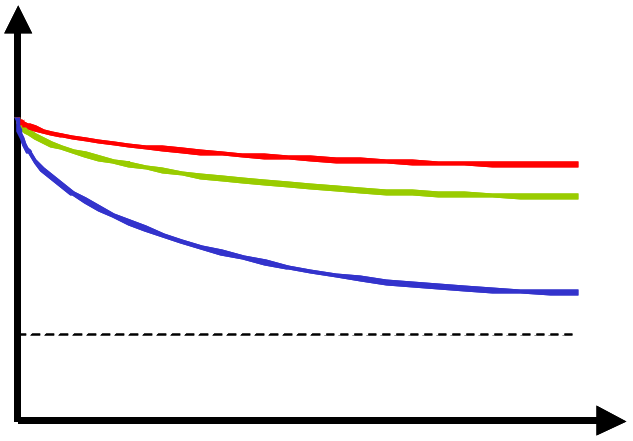

Fig. 9.39 – Esempio n° 1: parete monostrato

- **Esempio n° 2** – La **figura 9.40** si riferisce ad una chiusura "a cappotto". Un elevato valore dell'indicatore I_1 è indice di buona propensione alla durata, ma non necessariamente di elevata durabilità. Anche in questo caso una stima della propensione all'affidabilità va condotta per valutare le componenti esecutiva ed inerente. Di fronte a bassi indici di questi due aspetti, il rischio connaturato ad un precoce raggiungimento del limite prestazionale è concreto. Patologie riguardanti l'intonaco armato, preposto all'importantissimo compito di proteggere lo strato isolante, porterebbero all'entrata in crisi dell'intera struttura.

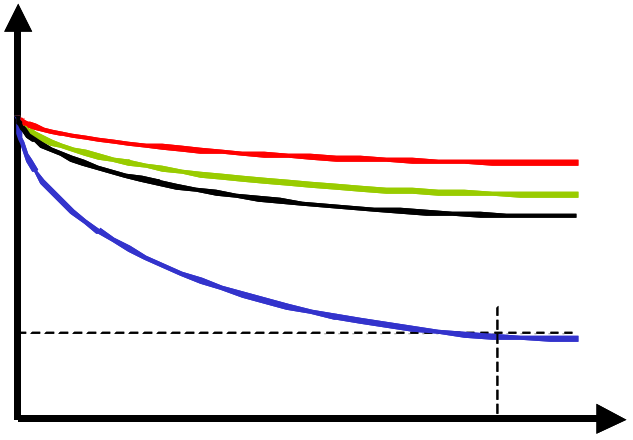

Fig. 9.40 – Esempio n° 2: parete "a cappotto"

- **Esempio n° 3** – L'analisi merceologica, condotta sul modello oggettuale del componente edilizio può essere un ulteriore strumento di indirizzo. Al contrario degli esempi precedenti, la valenza di un limite prestazionale relativamente basso potrebbe essere riconsiderata tenendo conto del livello di protezione dell'isolante e della sensibilità di quest'ultimo all'acqua; un isolante idrofobo e finito con un foglio in polietilene potrebbe indurre il progettista a scegliere ugualmente la soluzione rappresentata nella seguente **figura 9.41**.

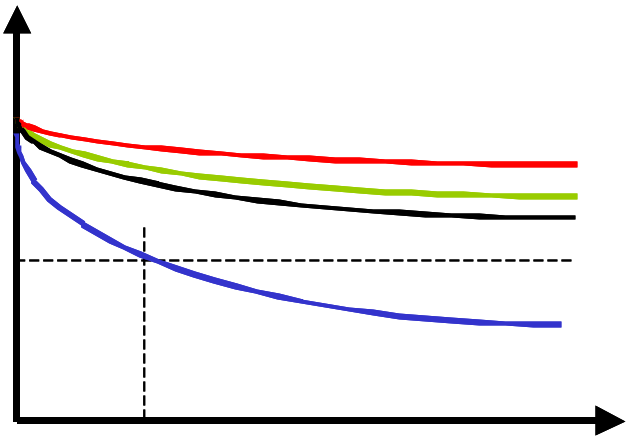

Fig. 9.41 – Esempio n° 3: l'importanza della merceologia

Tutte le considerazioni svolte in queste pagine sono frutto di un'analisi condotta a livello di "propensione"; sia essa una propensione alla durata, o una propensione all'affidabilità, ha lo scopo di accompagnare il progettista verso la scelta più oculata possibile, determinata a valle di un processo che lo porti ad essere sufficientemente sicuro della durata dell'elemento tecnico che comparirà all'interno di uno specifico progetto. Questo percorso, orientato ad una riduzione del rischio di adottare soluzioni tecniche non conformi, viene riassunto nel diagramma di **figura 9.42**.

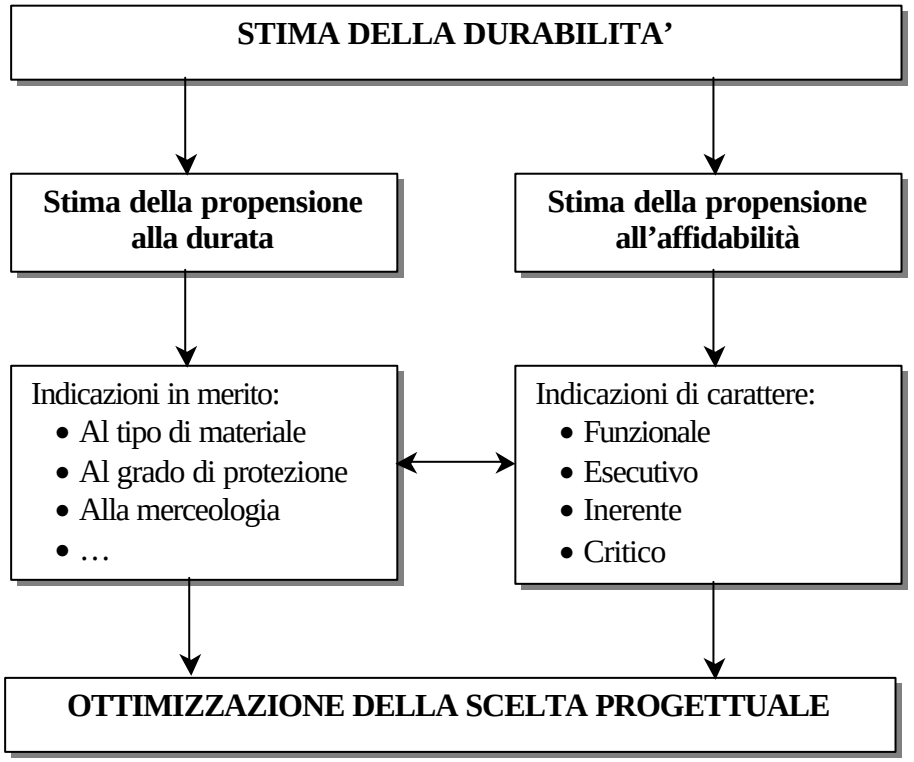

Fig. 9.42 – Impostazione di un percorso metodologico di stima della durabilità

9.10 Limiti e campi di applicazione

Per alcuni versi, ai contenuti di questo paragrafo si è già fatto cenno nel corso del capitolo. Si è già detto che uno dei limiti del PLM (forse il limite maggiore) risiede nel fatto che ad oggi non sia possibile disporre delle curve di decadimento delle caratteristiche funzionali per una stima *quantitativa* della vita utile di elementi tecnici. A tale mancanza si sopperisce impostando un'analisi in termini di "propensione alla durata" che valuti la probabilità del raggiungimento di valori più o meno elevati di vita utile, in un'ottica di comparazione all'interno di un repertorio di elementi tecnici omogenei, ovvero appartenenti alla stessa classe. Abbiamo anche visto come sia necessario acquisire informazioni di diversa natura per sfruttare al meglio questo strumento; il metodo di stima della propensione all'affidabilità, volto ad identificare e minimizzare l'insorgenza di patologie di vario genere, può essere convenientemente utilizzato (in parallelo col PLM) per ampliare lo spettro di conoscenze necessarie a comprendere il grado di errore che si può compiere nella comparazione di due o più soluzioni tecniche. E' stato parimenti chiarito il campo di applicazione di quest'ultimo metodo, valido esclusivamente per soluzioni tecniche per le quali sia già stata verificata e garantita una sufficiente qualità tecnologica caratteristica.
Un aspetto sul quale forse il lettore non si è soffermato a riflettere, ma che è importante far rilevare, riguarda i valori restituiti dal metodo dei limiti prestazionali. L'analisi che viene compiuta è di tipo puramente matematico, ed è tesa ad individuare quelle soglie oltre le quali il comfort termo-igrometrico dell'ambiente in cui l'utente finale svolgerà le proprie funzioni non è più garantito. Tali valori, di conseguenza, non hanno un immediato significato fisico e quindi potrebbero non costituire effettivo rischio per il soddisfacimento delle prestazioni ambientali fornite dal pacchetto tecnologico.
La **figura 9.43** aiuterà a comprendere meglio questo concetto.

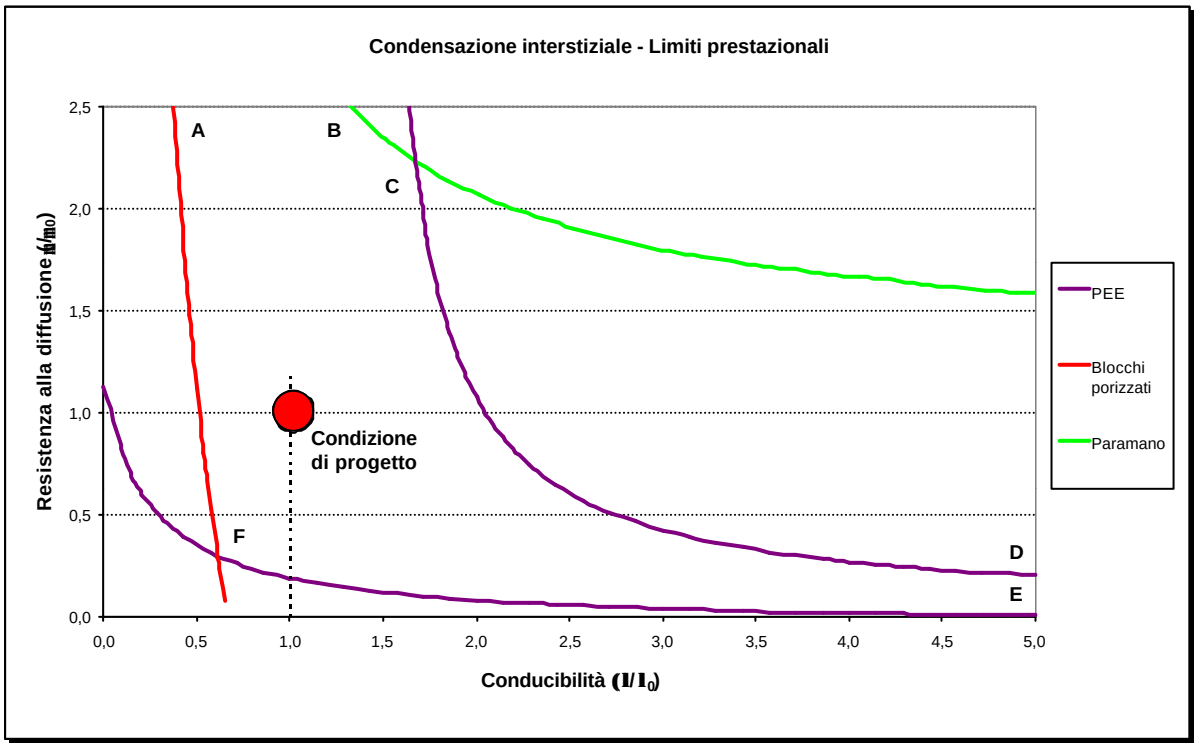

Fig. 9.43 – Soluzioni matematiche del problema "condensazione interstiziale"

Il grafico riguarda la chiusura faccia a vista, e rappresenta le coppie di valori (λ, μ) che definiscono il limite tra la condizione di "condensa" e quella di "non condensa".
Il dominio delle soluzioni è dato dall'area compresa tra i punti A, B, C, D, E ed F, che soddisfa contemporaneamente l'assenza di condensa all'interno della chiusura per ogni strato funzionale. La condizione di progetto è evidenziata dall'indicatore circolare di colore rosso, e rappresenta la coppia di valori iniziali (λ_0, μ_0). Il fatto che l'indicatore sia particolarmente vicino alla curva rossa sulla sua sinistra (associata ai blocchi porizzati) va considerato come particolarmente pericoloso? Per rispondere bisogna associare un significato "fisico" a tali variabili, considerando che il "degrado" evolverà in direzione di un aumento della conducibilità degli elementi costituenti la parete, associato molto probabilmente ad un aumento della resistenza alla diffusione al vapore. In altri termini, il percorso che compierà la chiusura nel tempo è indicato nella **figura 9.44**, in cui compare anche il "reale" dominio delle soluzioni costituenti il limite prestazionale (area compresa tra i punti A', B, C, D' ed E').

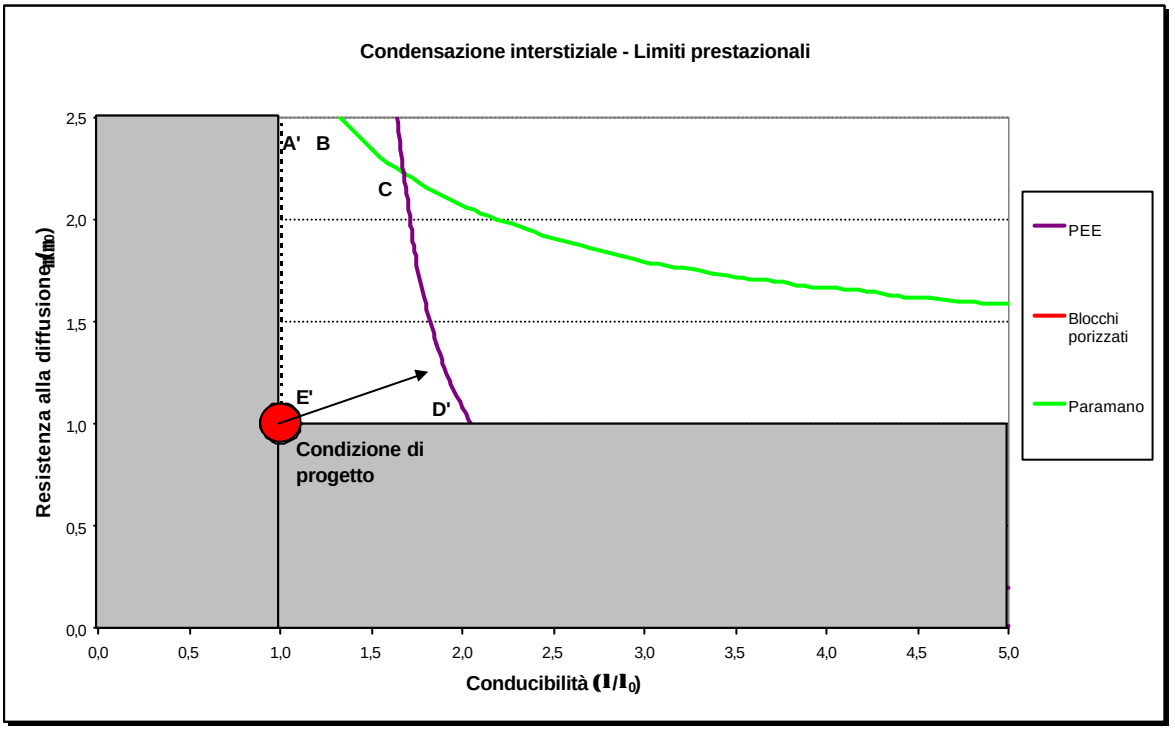

Fig. 9.44 – Soluzioni fisiche del problema "condensazione interstiziale"

Sarà cura del progettista saper scegliere all'interno di tutte le soluzioni restituite dal metodo quelle davvero "pericolose", che coincidono cioè con un effettivo degrado delle caratteristiche funzionali.
In ogni caso, anche le soluzioni scartate potrebbero fornire contributi interessanti al progettista. Se è vero che la resistenza alla diffusione nel tempo tenderà spontaneamente ad aumentare, è altrettanto vero che la figura precedente mostra come al tempo t_0 (λ_0, μ_0), un valore μ/μ_0 prossimo a 0,2 relativamente all'isolante porterebbe la chiusura a condensare.

Di questa informazione se ne dovrà tenere conto durante la posa in opera dei pannelli, quando eventuali errori di posizionamento dei pannelli creerebbero localmente zone caratterizzate da valori di μ tali da compromettere il soddisfacimento della prestazione[67].

Infine si vuole sottolineare come il fatto di non associare una connotazione temporale ai limiti prestazionali non rappresenti solamente uno svantaggio. Un'indicazione temporale sarà sicuramente utile per la determinazione della vita utile del componente edilizio, intesa come **durata spontanea** di quest'ultimo a fronte di un **invecchiamento naturale**. D'altra parte, prescindere da questo legame con la variabile "tempo" consente di leggere il limite prestazionale come valore di soglia oltre il quale, *qualsiasi cosa succeda all'elemento tecnico*, si rende necessario un intervento manutentivo volto a ripristinare un livello prestazionale non più accettabile.

Letto in questo senso, il limite fornisce una chiave di lettura su cui innestare discorsi relativi a **patologie edilizie** dell'elemento tecnico, ovvero analizzare fenomeniche di degrado che si traducono in problemi di **invecchiamento accelerato** (**fig. 9.45**).

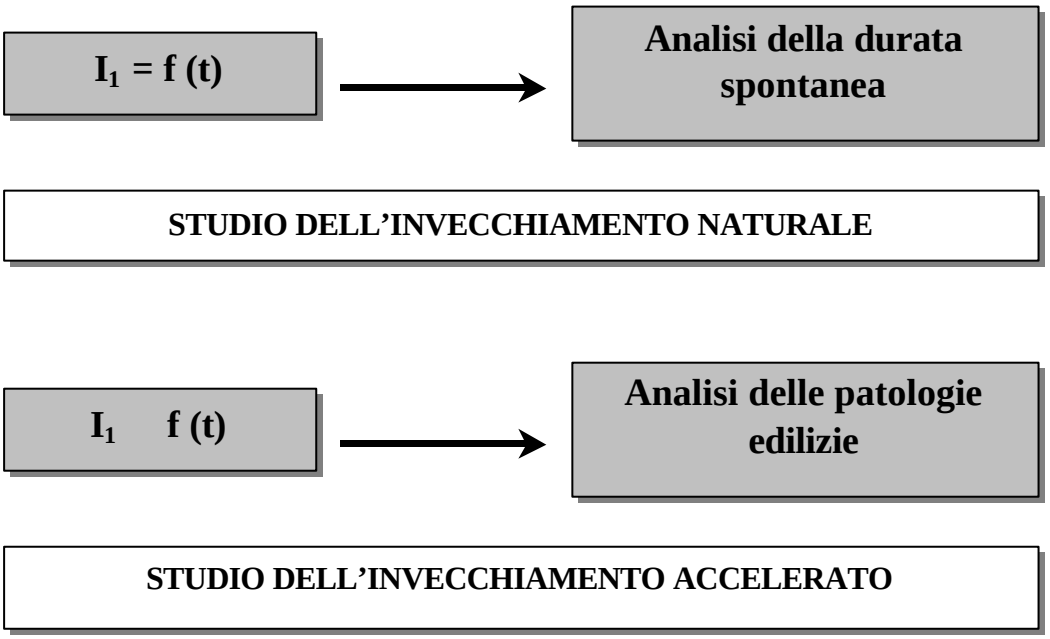

Fig. 9.45 – Possibili chiavi di lettura dei limiti prestazionali

[67] La presenza di eventuali discontinuità all'interfaccia tra i vari pannelli non inciderebbe invece sulla conducibilità, dal momento che comunque l'aria in quiete è caratterizzata da valori di λ prossimi a quelli di un comune isolante (λ_{aria} = 0,026 W/mK).

9.11 Sviluppi futuri della ricerca

La procedura proposta in queste ultime pagine è stata sviluppata per sopperire ad una temporanea carenza di informazioni, necessarie come dati di input per il corretto funzionamento del PLM. Tale metodo, non essendo mai stato applicato fino in fondo, ha bisogno pertanto di una completa validazione. Ciò sarà possibile avendo a disposizione le curve di decadimento delle caratteristiche funzionali, o sulla base di informazioni disponibili in banche dati di durata, ovvero dai risultati degli invecchiamenti accelerati (in laboratorio) e naturali (in esterno) e dai risultati provenienti da monitoraggi degli edifici.
Una seconda linea di sviluppo della ricerca potrebbe essere quella di estendere la metodologia di simulazione dei decadimenti anche ad altre prestazioni, ampliando per esempio il suo campo d'applicazione alla meccanica, piuttosto che all'acustica. Per fare ciò, si dovrà anche compiere un'indagine sui principali metodi normati (o comunque ampiamente accettati), sia a livello nazionale che internazionale.
Infine sarebbe auspicabile che il metodo, ad oggi è ristretto ad una limitata cerchia di "addetti ai lavori", possa essere reso pienamente fruibile da chiunque; ciò significherebbe implementare un software maggiormente "user friendly", la cui interfaccia consenta di esportarlo e renderlo accessibile ad un vasto bacino d'utenza.

Cap. 10 – Il contributo del CSTB[68]: FMEA e FMECA

Nato negli anni '60 per essere applicato nel campo dell'elettronica e dell'aeronautica, FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) è un metodo per l'indagine dei modi di guasto. In particolare si tratta di un modello previsionale basato sulla stima del rischio di non funzionamento di elementi tecnici, finalizzato all'individuazione di tutti i possibili guasti che potrebbero sopraggiungere per errori progettuali e/o esecutivi durante la vita utile dell'elemento, oppure a seguito di naturale invecchiamento.
La sua applicazione in campo edilizio è dovuta al lavoro svolto negli ultimi anni all'interno del CSTB [Lair 2000] [Talon *et al.* 2003] e il metodo, opportunamente adattato ad una realtà poco assimilabile a quella industriale (che prevede produzioni di massa), consente di addivenire ad una visione generale ed esaustiva degli scenari dei degradi[69] che potranno affliggere l'opera edilizia nel corso della sua vita utile.
Attraverso un'analisi sistematica dell'organismo edilizio scomposto nelle sue componenti fondamentali, FMEA consente dunque di trarre informazioni preziose in prospettiva di una programmazione della manutenzione, fornendo un quadro completo delle più o meno plausibili fenomeniche di degrado che porteranno l'organismo progettato ad uno stato di non funzionamento. La sua applicazione porta ad un'esaustiva lista di tutti gli scenari dei degradi che potrebbero presentarsi nelle diverse fasi del processo edilizio[70]:

- **Fase decisionale:** problemi dati da incompatibilità chimico-fisiche o meccaniche di materiali e/o prodotti accostati tra loro (si pensi ad esempio all'insorgenza di fenomeni di corrosione galvanica o di tensioni interne innescate da fenomeni inerenti). Qualora l'analisi venga estesa ad elementi tecnici "a sistema", sarà di fondamentale importanza tenere conto anche delle problematiche che potrebbero insorgere nei cosiddetti "nodi", punti di incontro dei diversi pacchetti tecnologici (si pensi all'importanza dei giunti o dei ponti termici, che potrebbero vanificare precise scelte progettuali tese al risparmio energetico);
- **Fase esecutiva:** problemi dati da errori durante le fasi di trasporto, di stoccaggio, di posa in opera dei componenti edilizi (errato confezionamento in opera di malte e calcestruzzi, mancato rispetto dei tempi di maturazione, scarsa attenzione agli spessori di copriferro, …). La fase esecutiva risulta di fondamentale importanza nel processo edilizio, giacché errori in questa fase potrebbero avere notevoli ripercussioni sulle funzionalità dell'organismo edilizio, compromettendo la rispondenza tra il progetto e l'opera realizzata; è pertanto di primaria importanza che le opere vengano realizzate "a regola d'arte";

[68] Lo sviluppo del presente capitolo è stato possibile grazie al contributo di Aurélie TALON, dottoranda di ricerca presso il CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – Département Développement Durable – Division Environnement et Durabilité, Grenoble) e presso il LGC (Laboratoire Génie Civil, Clermont-Ferrand).
[69] Con la locuzione "scenario dei degradi" si intende una vera e propria catena di degradi, la cui nascita può risalire addirittura alle prime fasi processuali (vedi nota successiva). Uno stesso scenario può interessare (come vedremo in seguito) differenti elementi funzionali e può condurre al non funzionamento del singolo componente edilizio piuttosto che dell'intero elemento tecnico.
[70] Per maggiori chiarimenti si veda la UNI 10723:1998 *Edilizia – Processo edilizio – Classificazione e definizione delle fasi processuali degli interventi edilizi di nuova costruzione*

- **Fase gestionale:** problemi dati dal naturale degrado dei prodotti utilizzati. Per quanto l'usura di componenti edilizi ed impianti sia inevitabile, uno scorretto utilizzo degli stessi comporterebbe degradamenti ed usure accelerate, e pertanto imprevedibili in fase progettuale. E' quindi fondamentale che durante la loro vita utile, tutti componenti siano soggetti a corrette condizioni d'uso e sollecitazione, nonché ad attività di manutenzione ordinaria volte ad ottimizzarne l'efficienza prestazionale.

La **figura 10.1** illustra l'articolazione del metodo, che si propone evidentemente come metodo di indagine conoscitiva e, pertanto, qualitativa.

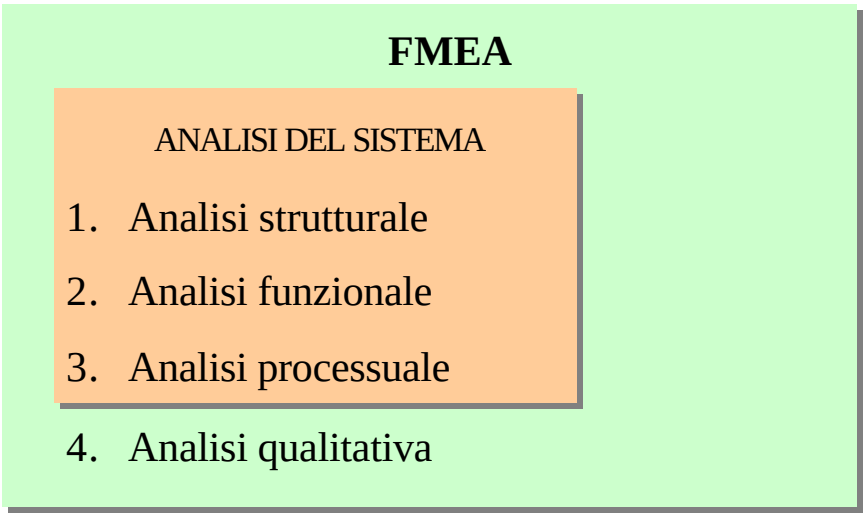

Fig. 10.1 – Analisi del sistema e FMEA

Propedeutica all'applicazione vera e propria del metodo, vi è un'analisi del sistema, attraverso la quale si raccolgono tutte quelle informazioni necessarie ad identificare l'elemento tecnico.
Nelle pagine seguenti saranno sviluppate, una per una, tutte queste fasi, applicandole ad uno dei due casi di studio presi in considerazione nel precedente capitolo 9 (in particolare alla chiusura pluristrato).
Si ritiene interessante, difatti, entrare più nel dettaglio di questa metodologia applicata al campo edilizio, per la quale in Italia se ne contano pochi esempi in letteratura.

10.1 Analisi strutturale

10.1.1 Descrizione dell'elemento tecnico (sintetica e merceologico-produttiva)

Il primo passo da compiere per l'applicazione dello FMEA è quello di caratterizzare completamente la soluzione tecnica attraverso gli elementi funzionali che la costituiscono.
Oltre a questo tipo di descrizione, si rende ovviamente necessaria anche una descrizione merceologica che entri più nel merito delle peculiarità dei materiali adottati.
Una descrizione sintetica della chiusura pluristrato è data dalla **tabella 10.2**.

ELEMENTO FUNZIONALE	DESCRIZIONE MERCEOLOGICA E PRODUTTIVA	SPESSORE (cm)
Intonaco civile interno	Intonaco civile di cemento R 325, calce aerea e sabbia	1,5
Mattoni forati	Mattoni forati (fori orizzontali) con connessioni orizzontali e verticali continue di malta di allettamento (cemento Portland R 325 e sabbia)	8 * (25 * 12)
Pannelli isolanti	Pannelli in lana di vetro con resine termoindurenti	4 * (200 * 200)
Collante	Collante a base sintetico-cementizia applicato in modo continuo e costituito da cemento Portland R 425, sabbia e resine epossidiche	0,5
Mattoni semipieni	Mattoni semipieni (fori verticali) con connessioni orizzontali e verticali continue di malta di allettamento (cemento Portland R 325 e sabbia)	12 * (25 * 12)
Intonaco civile esterno	Intonaco civile di cemento R 325, calce aerea e sabbia	1,5
Rivestimento protettivo	Rivestimento plastico a base di resine acriliche, pigmenti e cariche	…

Tab. 10.2 – Descrizione merceologico-produttiva

10.1.2 Decomposizione del pacchetto tecnologico

In questa fase vengono presi in considerazione tutti i prodotti costituenti i differenti elementi funzionali, individuando precisamente i materiali di cui sono formati; questo si rivelerà utile per la determinazione delle interfacce, nonché per la successiva rappresentazione strutturale (**tab. 10.3**).

REF	NOME DELL'ELEMENTO	MATERIALE
1	Rivestimento interno	Cemento R 325, calce aerea e sabbia
2a	Mattone "a" per muratura interna	Laterizio
2b	Mattone "b" per muratura interna	Laterizio
3	Malta per muratura interna	Cemento R 325 e sabbia
4	Isolante	Lana di vetro
5	Collante	Cemento R 425, sabbia e resine epossidiche
6a	Mattone "a" per muratura esterna	Laterizio
6b	Mattone "b" per muratura esterna	Laterizio
7	Malta per muratura esterna	Cemento R 325 e sabbia
8	Rivestimento esterno	Cemento R 325, calce aerea e sabbia
9	Strato protettivo	Idropittura acrilica

Tab. 10.3 – Decomposizione del pacchetto tecnologico

10.1.3 Determinazione e caratterizzazione delle interfacce

Nello studio degli scenari, la comprensione delle modalità di vincolo all'interno del pacchetto tecnologico riveste un aspetto estremamente importante, dal momento che queste potrebbero dare origine a guasti causati da fenomeni meccanici piuttosto che inerenti.
Attraverso la tabella a doppia entrata riportata in **figura 10.4** vengono determinate tutte le interfacce presenti all'interno della soluzione tecnica, mentre la **tabella 10.5** consente una loro caratterizzazione in termini di geometria e tipologia di solidarizzaizone delle stesse.

	1	2a	2b	3	4	5	6a	6b	7	8	9
1		x	x	x							
2a	x			x	x						
2b	x			x	x						
3	x	x	x		x						
4		x	x	x		x					
5					x		x	x	x		
6a						x			x	x	
6b						x			x	x	
7						x	x	x		x	
8							x	x	x		x
9										x	

Fig. 10.4 – Determinazione delle interfacce

NUMBER	INTERFACE NAME	GEOMETRY	BOUNDARY MODE
1/2a	Internal coat – Internal brick (a)	Surface	Glued
1/2b	Internal coat – Internal brick (b)	Surface	Glued
1/3	Internal coat – Internal mortar	Surface	Glued
2a/3	Internal brick (a) – Internal mortar	Surface	Glued
2a/4	Internal brick (a) – Insulation	Surface	Simple contact
2b/3	Internal brick (b) – Internal mortar	Surface	Simple contact
2b/4	Internal brick (b) – Insulation	Surface	Simple contact
3/4	Internal mortar – Insulation	Surface	Glued
4/5	Insulation – Adhesive	Surface	Glued
5/6a	Adhesive – External brick (a)	Surface	Glued
5/6b	Adhesive – External brick (b)	Surface	Glued
5/7	Adhesive – External mortar	Surface	Glued
6a/7	External brick (a) – External mortar	Surface	Glued
6a/8	External brick (a) – External coat	Surface	Glued
6b/7	External brick (b) –External mortar	Surface	Glued
6b/8	External brick (b) – External coat	Surface	Glued
7/8	External mortar – External coat	Surface	Glued
8/9	External coat – Protective film	Surface	Glued

Tab. 10.5 – Caratterizzazione delle interfacce

10.1.4 Rappresentazione strutturale

La rappresentazione strutturale del pacchetto tecnologico riassume tutti i risultati ottenuti in precedenza e che serviranno per i punti successivi (analisi funzionale e processuale).
Tale rappresentazione è volta ad identificare tutti gli elementi funzionali coinvolti nel pacchetto, evidenziando anche quelli cui spettano unicamente funzioni di solidarizzazione.
Nella **figura 10.6** viene anche definita, attraverso opportune scelte cromatiche, la somiglianza merceologica tra i vari prodotti; questo consente di individuare a prima vista le tipologie di solidarizzazione simili all'interno della stessa soluzione tecnica, caratterizzate da uno stesso abbinamento cromatico.

I codici adottati in questa fase saranno utili nel proseguo del metodo per identificare in maniera sintetica ed univoca i differenti componenti edilizi.
Un tratteggio indica i luoghi deputati alla funzione di interfaccia tra due elementi contigui.

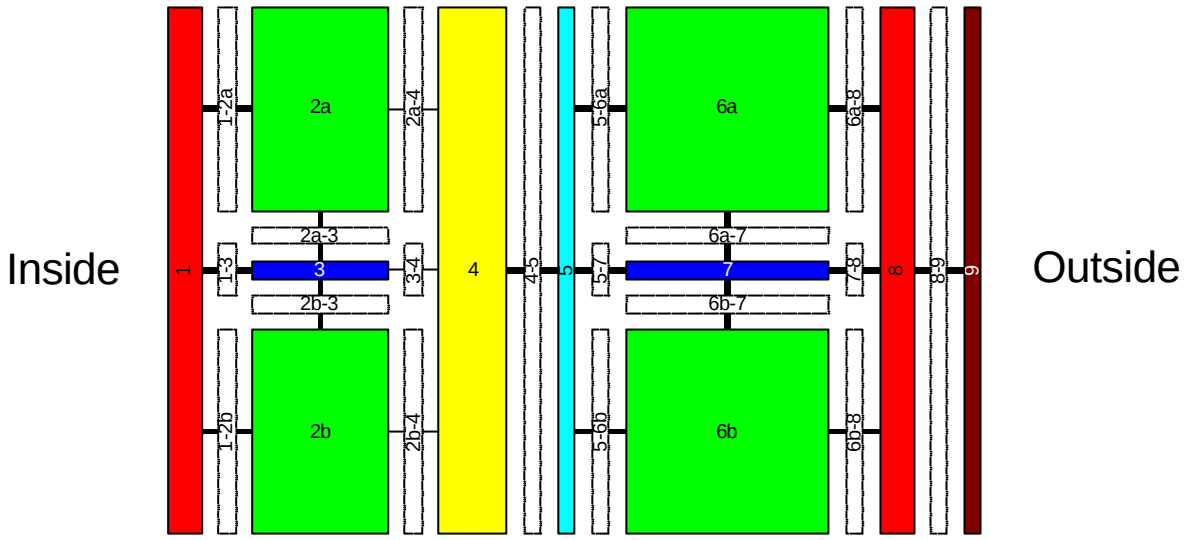

Fig. 10.6 – Rappresentazione strutturale

10.1.5 Caratterizzazione ambientale

Un ulteriore passo per la definizione degli scenari dei degradi è la determinazione degli agenti presenti nel contesto ambientale in cui sorgerà l'intervento. Le **tab. 10.7** e **10.8** sono tratte da un database sviluppato all'interno del CSTB; fonti alternative possono essere individuate in standard nazionali[71] od internazionali[72].

[71] UNI 8290-3:1987 *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti.*
[72] ISO 6241:1984 *Performance standards in buildings – Principles for their preparation and factors to be considered.*

- **Ambiente interno:**

Agent class	Environmental agent	
Liquid	Solvents / Detergents (bleach) / Desinfectant / Alcohol	
Vapour	Humidity	
Gas	Main components of the atmosphere	Oxygen
		Nitrogen
	Other components of the atmosphere	Hydrogen
		Ozone
	Contaminant	Sulfuric acid (SO_x)
		Oxides of nitrogen (NO_x)
		Carbonic acid (CO, CO_2)
Radiation	Solar radiation (light)	
	Solar radiation (heat)	
	Lamps radiation	
Animals and bacteria	Vertebrate (Birds, Mammal)	
	Unvertebrate (Insects, Termite, Roden, Worm)	
	Bacteria	
Vegetables and microbes	Moulds	
	Fungi	
Noise	Internal air noise (Music, dancers, domestic appliances, …)	
	External air noise (aeroplanes, explosions, traffic,…)	
	Impact noise on floor	
	Machinery noise	
Mechanical agent	Load	
	Compression effort	
	Tractive effort	
	Flexion effort	
	Shear effort	
	Pressure	
	Vibration	
	Earthquake	
	Wind	
	Friction	
	Hard impact	
	Limp impact	

Tab. 10.7 – Caratterizzazione dell'ambiente interno

- **Ambiente esterno:**

Agent class	Environmental agent	
Liquid	Water	
	Solvents / Detergents (bleach) / Desinfectant / Alcohol	
	Contaminant	Oxydes of nitrogen (NO_x)
		Sulfuric acid (SO_x)
		Carbonic acid (CO_x)
		Salts dissolved
Vapour	Humidity	
Gas	Main components of the atmosphere	Oxygen
		Nitrogen
	Other components of the atmosphere	Hydrogen
		Ozone
	Contaminant	Sulfuric acid (SO_x)
		Oxides of nitrogen (NO_x)
		Carbonic acid (CO, CO_2)
		Agent of combustion
Radiation	Solar radiation (light)	
	Solar radiation (heat)	
Temperature	High	
	Low	
	Cyclic (frost/no-frost)	
	Thermal shock	
Animals and bacteria	Vertebrate (Birds, Mammal)	
	Unvertebrate (Insects, Termite, Roden, Worm)	
	Bacteria	
Vegetables and microbes	Moulds	
	Fungi	
Noise	External air noise (aeroplanes, explosions, traffic,…)	
	Impact noise on floor	
	Machinery noise	
Mechanical agent	Load	
	Compression effort	
	Tractive effort	
	Flexion effort	
	Shear effort	
	Pressure	
	Vibration	
	Earthquake	
	Wind	
	Friction	
	Hard impact	
	Limp impact	
Precipitation	Hail	
	Snow	
	Rain	
	Fog	

Tab. 10.8 – Caratterizzazione dell'ambiente esterno

10.2 Analisi funzionale

Tale analisi è tesa a comprendere come si comporta la soluzione tecnica attraverso i suoi elementi funzionali, soggetti al soddisfacimento di determinate funzioni. Il modello funzionale così definito consente di comprendere più a fondo il comportamento del pacchetto tecnologico a fronte degli agenti sollecitanti precedentemente individuati.
A scanso di equivoci, e bene chiarire immediatamente al lettore la profonda differenza tra l'analisi funzionale condotta in questa sede (così come intesa dal CSTB) e quella sviluppata all'interno del nostro Dipartimento e già illustrata nel corso della trattazione.
Pur mantenendo lo stesso nome, difatti, i due procedimenti hanno finalità differenti, e il differente approccio porta alla realizzazione di modelli comportamentali del tutto inconciliabili.

- **Analisi funzionale BEST**: analisi volta ad individuare le funzioni analitiche soddisfatte dai differenti elementi funzionali costituenti l'elemento tecnico, attraverso una valutazione quantitativa delle caratteristiche funzionali. Culmina nella determinazione di un modello funzionale, insieme strutturato di luoghi funzionali sui quali si distribuiscono tutte le funzioni analitiche secondo cui le funzioni base caratteristiche del dato repertorio si sono articolate. Il modello ottenuto riepiloga le pertinenti attribuzioni agli strati delle funzioni analitiche caratterizzanti tutti i modelli funzionali elementari propri della corrispondente soluzione tecnica;
- **Analisi funzionale CSTB**: analisi volta ad individuare le fenomeniche di *transfert* degli agenti attraverso la soluzione tecnica. Lo studio muove direttamente dalla caratterizzazione ambientale di cui al § 10.1.5, e si sviluppa associando agli elementi funzionali determinate funzioni.

La successiva **tabella 10.9** è un estratto di un altro database realizzato all'interno del CSTB; al suo interno vi possiamo trovare tutte e sole le funzioni da tenere in considerazione nell'applicare il metodo alla soluzione tecnica indagata.
Le differenti codifiche dipendono dal fatto che le funzioni sono suddivise in tre famiglie [Talon *et al.* 2004];

- **Funzioni utente (Fu)**: funzioni corrispondenti a requisiti essenziali per i quali il prodotto è realizzato, e che soddisfano direttamente le esigenze dell'utente finale. Per esempio, nel caso di una copertura piana l'utente finale/committente si aspetta che questa assicuri due funzioni principali: isolamento termico e tenuta all'acqua [Lair *et al.* 2002a];
- **Funzioni tecniche (Ft)**: funzioni che consentono al componente edilizio di arrivare a svolgere le funzioni utente. Sempre nel caso della copertura piana, sono necessarie altre funzioni (più tecniche) per garantire quanto richiesto esplicitamente dall'utente finale/committente: la capacità di scorrimento tra membrana impermeabilizzante e pannelli isolanti (che qualora mancasse potrebbe generare problemi di tensioni interne e, successivamente, fessurazioni della guaina) e la resistenza di tutti gli elementi funzionali ad agenti ambientali (interni od esterni);
- **Funzioni fondamentali (Fc)**: funzioni che garantiscono in ogni caso il soddisfacimento di vincoli primari quali le esigenze dell'utente e la conformità agli standard di progettazione.

REF.	FUNCTIONS	REF.	FUNCTIONS
Fu1	To be tight to liquid	Ft9	To resist to cyclic temperatures
Fu2	To be tight to vapour	Ft10	To resist to vertebrates
Fu3	To be tight to gas	Ft11	To resist to unvertebrates
Fu4	To be tight to animals and bacteria	Ft12	To resist to bacteria
Fu5	To be tight to vegetables	Ft13	To resist to vegetables
Fu6	To be tight to hail	Ft14	To resist to external air noise
Fu7	To be tight to snow	Ft15	To resist to internal air noise
Fu8	To absorb solar radiation (heat)	Ft16	To resist to impact noise on floor
Fu9	To absorb high temperatures	Ft17	To resist to machinery noise
Fu10	To absorb low temperatures	Ft18	To resist to loads
Fu11	To absorb external air noise	Ft19	To resist to compression efforts
Fu12	To absorb internal air noise	Ft20	To resist to tractive efforts
Fu13	To absorb impact noise on floor	Ft21	To resist to flexion efforts
Fu14	To absorb machinery noise	Ft22	To resist to shear efforts
Fu15	To absorb wind effects	Ft23	To resist to pressure
Fu16	To absorb hard impacts	Ft24	To resist to vibrations
Fu17	To absorb limp impacts	Ft25	To resist to friction
Fu18	To transmit loads	Ft26	To resist to hard impacts
Ft1	To resist to liquid	Ft27	To resist to limp impacts
Ft2	To resist to vapour	Ft28	To resist to wind
Ft3	To resist to gas	Ft29	To hold in position
Ft4	To resist to radiations	Ft30	To glue
Ft5	To resist to fire	Ft31	To resist to precipitations
Ft6	To resist to high temperatures	Fc1	To be conform to demands
Ft7	To resist to low temperatures	Fc2	To be conform to standards
Ft8	To resist to thermal shocks		

Tab. 10.9 – Funzioni indagate

Tali famiglie peraltro sono strutturate in modo tale che il non soddisfacimento di una funzione utente o fondamentale comporta il non funzionamento dell'intera soluzione tecnica, mentre quello di una funzione tecnica si limita a compromettere il funzionamento del solo componente interessato. Di seguito (**tab. 10.10** e **10.11**) viene proposto il modello funzionale ricavato da questo tipo di analisi; i codici che compaiono nelle righe sono relativi agli elementi funzionali, mentre quelli nelle colonne si riferiscono alle funzioni.

	Fu1	Fu2	Fu3	Fu4	Fu5	Fu6	Fu7	Fu8	Fu9	Fu10	Fu11	Fu12	Fu13	Fu14	Fu15	Fu16	Fu17	Fu18	Ft1	Ft2	Ft3	Ft4	Ft5	Ft6	Ft7	Ft8
1				x	x			x	x	x	x			x		x	x			x	x	x	x	x	x	x
2a								x	x	x	x			x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
2b								x	x	x	x			x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
3								x	x	x	x			x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
4								x	x	x	x	x	x	x				x		x	x	x		x	x	x
5								x	x	x	x			x						x	x	x		x	x	x
6a								x	x	x	x			x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
6b								x	x	x	x			x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
7								x	x	x	x			x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
8								x	x	x	x			x		x	x			x	x	x	x	x	x	x
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x

Tab. 10.10 – Analisi funzionale (continua)

	Ft9	Ft10	Ft11	Ft12	Ft13	Ft14	Ft15	Ft16	Ft17	Ft18	Ft19	Ft20	Ft21	Ft22	Ft23	Ft24	Ft25	Ft26	Ft27	Ft28	Ft29	Ft30	Ft31	Fc1	Fc2
1	x	x	x	x	x	x			x		x	x					x	x	x					x	x
2a	x					x			x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x			x	x
2b	x					x			x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x			x	x
3	x					x			x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x		x	x
4	x					x	x	x	x	x														x	x
5	x					x			x												x	x		x	x
6a	x					x			x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x			x	x
6b	x					x			x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x			x	x
7	x					x			x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x
8	x					x			x		x							x	x		x			x	x
9	x	x	x	x	x	x			x		x						x	x	x				x	x	x

Tab. 10.11 – Analisi funzionale

10.3 Analisi processuale

Completata l'analisi funzionale, si tratta di indagare tutti i possibili e plausibili errori che potrebbero sopraggiungere durante la fase esecutiva (**tab. 10.12**), compromettendo il corretto funzionamento del pacchetto tecnologico fin dalle prime fasi processuali.
In questa sede è importante riuscire a prevedere eventuali criticità dovute ad errori nel trasporto, nello stoccaggio, nella miscelazione di prodotti multi-componente, nel posizionamento e nella posa in opera, poiché questi costituiscono possibili elementi di non rispondenza tra il progettato e l'eseguito.
Per altro, le ricadute di tali analisi si riveleranno utili in fase di progettazione esecutiva dell'intervento, determinando i momenti e le attività più delicate durante il processo di costruzione dell'opera stessa.

Stage	Building component	Degradation mode	Causes & notes		Effects
0	-	Wrong tracement (direction of the wall)	Actor	Unexperience	Non conformity between design and building work
			Mean	Unadapted means	
			Method		
			Material		
			Environment		
1	6b	Lack of planarity	Actor		Decreasing of mechanical properties Instability Lack of planarity of the wall
			Mean		
			Method		
			Material		
			Environment	Support planarity	
2	7 on 6b	Efflorescences	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of esthetic properties
			Mean	Lack of washing	
			Method		
			Material		
			Environment		
2	7 on 6b	Wrong mix-design	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of adhesion Instability
			Mean		
			Method		
			Material	X	
			Environment		
2	7 on 6b	Insufficient adhesion	Actor	X	Decreasing of mechanical properties of the interface Instability
			Mean	Lack of cleaning	
			Method		
			Material		
			Environment		
2	7 on 6b	Drying of mortar	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of adhesion Instability
			Mean	Lack of washing	
			Method		
			Material		
			Environment		
3	6a on (7-6b)	Lack of planarity	Actor	X	Instability

			Mean	X	Lack of planarity of the wall
			Method		
			Material		
			Environment		
4	5 on (6a-7-6b)	Insufficient adhesion	Actor	X	Decreasing of mechanical properties of the interface
			Mean	Lack of cleaning	
			Method		
			Material		
			Environment		
4	5 on (6a-7-6b)	Lack of planarity	Actor	X	Lack of planarity of the wall
			Mean		
			Method		
			Material	Thickness of glue	
			Environment		
4	5 on (6a-7-6b)	Wrong mix-design	Actor	X	Decreasing of adhesion
			Mean		
			Method		
			Material		
			Environment		
5	4 on 5	Water or humidity absorption	Actor		Decreasing of thermal properties Decreasing of mechanical properties
			Mean	Storage	
			Method		
			Material		
			Environment	Humidity	
6	2b	Lack of planarity	Actor		Decreasing of mechanical properties Instability Lack of planarity of the wall
			Mean		
			Method		
			Material		
			Environment	Support planarity	
7	3 on 2b	Wrong mix-design	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of adhesion Instability
			Mean		
			Method		
			Material	X	
			Environment		
7	3 on 2b	Insufficient adhesion	Actor	X	Decreasing of mechanical properties of the interface Instability
			Mean	Lack of cleaning	
			Method		
			Material		
			Environment		
7	3 on 2b	Drying of mortar	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of adhesion Instability
			Mean	Lack of washing	
			Method		
			Material		
			Environment		
7	3 on 2b	Efflorescences	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of esthetic properties
			Mean	Lack of washing	
			Method		
			Material		
			Environment		
8	2a on (3-2b)	Lack of planarity	Actor	X	Instability Lack of planarity of the wall
			Mean	X	
			Method		
			Material		
			Environment		
9	8 on (6a-7-6b)	Wrong mix-design	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of adhesion Decreasing of hygrometrical properties
			Mean		
			Method		
			Material	X	
			Environment		
9	8 on (6a-7-6b)	Insufficient adhesion	Actor	X	Decreasing of mechanical properties of the interface
			Mean	Lack of cleaning	
			Method		
			Material		
			Environment		
9	8 on (6a-7-6b)	Drying	Actor		Cracking
			Mean		
			Method		
			Material		

			Environment	Wind, Temp., R.H.	
10	9 on 8	Wrong mix-design (Powder Volume Concentration)	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Lack of waterproofing
			Mean		
			Method		
			Material	X	
			Environment		
10	9 on 8	Drying	Actor		Cracking
			Mean		
			Method		
			Material		
			Environment	Wind, Temp., R.H.	
11	1 on (2a-3-2b)	Wrong mix-design	Actor	X	Decreasing of mechanical properties Decreasing of adhesion Decreasing of hygrometrical properties
			Mean		
			Method		
			Material	X	
			Environment		
11	1 on (2a-3-2b)	Lack of planarity	Actor	X	Decreasing of mechanical properties of the interface
			Mean	Lack of cleaning	
			Method		
			Material		
			Environment		
11	1 on (2a-3-2b)	Drying	Actor		Cracking
			Mean		
			Method		
			Material		
			Environment	Temp., R.H.	

Tab. 10.12 – Analisi processuale

10.4 Analisi qualitativa (FMEA)

Quest'analisi, vero e proprio cuore dello FMEA, è volta ad individuare:

- **Gli scenari dei degradi**: (per esempio fessurazioni, condensazioni, alterazioni cromatiche, …);
- **Le cause**: (per esempio shock termici, inquinamento, radiazioni, …);
- **Le conseguenze**: (per esempio effetti su stabilità, permeabilità, aspetto, …).

Il degrado di un elemento funzionale non comporta necessariamente il non funzionamento dell'intero pacchetto tecnologico, ma potrebbe determinare cambiamenti strutturali e quindi sollecitazioni inattese negli strati adiacenti; di conseguenza, andranno determinati non solo i degradi relativi ai differenti componenti costituenti l'elemento tecnico, ma anche (e soprattutto) gli scenari dei degradi (vere e proprie catene di eventi) che potrebbero portare, nel tempo, all'entrata in crisi dell'intero pacchetto. Quest'analisi, di tipo iterativo, consente di determinare una lista di tutti i possibili e plausibili scenari che conducono l'oggetto edilizio in una condizione di non funzionamento.
La **figura 10.13** rappresenta un estratto dell'intera tabella in cui si sostanzia FMEA; la grande quantità di informazioni disponibili, da un lato grazie ai database già presenti presso il CSTB, dall'altro grazie ad un lavoro sviluppato recentemente all'interno del nostro Dipartimento (ma non ancora pubblicato, pertanto non inserito in bibliografia) ha portato all'individuazione di ben 8836 scenari.

Function	Element	St.	Mode	Cause	Direct effect	Indirect effect
Fu8	1	0	Wrong mix-design	- Material - Workman	Decreasing of solar radiation absorption capacity	- Decreasing of mechanical properties - Decreasing of thermal properties - Decreasing of hygrometrical properties - Decreasing of adhesion
			Drying	- Temperature - Humidity ?		
			Peeling	- Wrong preparation of the support - Drying too fast	Decreasing of high temperature absorption capacity	- Decreasing of mechanical properties - Decreasing of thermal properties - Decreasing of hygrometrical properties - Decreasing of acoustical properties
			Efflorescence	Chimical incompatibility with bricks + Water		
		1	Blisters	Humidity	Decreasing of high temperature absorption capacity	- Decreasing of mechanical properties - Decreasing of thermal properties - Decreasing of hygrometrical properties - Decreasing of acoustical properties
			Efflorescence	Humidity + Salts		
	2a	0	Outburst	Presence of lime grains	Decreasing of solar radiation absorption capacity	- Decreasing of mechanical properties - Decreasing of thermal properties - Decreasing of hygrometrical properties - Decreasing of acoustical properties
			Efflorescence	Presence of soluble salts		
			Dilatation	Insufficient baking + Humidity		
			Cracking	Insufficient baking + Frost		
	3	0	Wrong mix-design	- Materials - Workman	Decreasing of solar radiation absorption capacity	- Decreasing of mechanical properties - Decreasing of thermal properties - Decreasing of hygrometrical properties - Decreasing of acoustical properties - Decreasing of adhesion - Instability
			Drying of mortar	- Lack of washing - Workman		
		1	Swelling	Absorption of humidity	Decreasing of solar radiation absorption capacity	- Decreasing of mechanical properties - Decreasing of thermal properties - Decreasing of hygrometrical properties - Decreasing of acoustical properties - Instability
			Carbonatation	Carbonic gas		
			Disintegration	Atmospheric pollutants		
			Chimical reaction	- Chlorides + Vapour - Acids + Vapour - Sulfates + Vapour - Salts + Vapour		
		2	Efflorescence	- Carbonatation (St.1) - Chimical reaction (St.1)	Decreasing of solar radiation absorption capacity	- Decreasing of mechanical properties - Decreasing of thermal properties - Decreasing of hygrometrical properties - Decreasing of acoustical properties - Instability
			Cracking	- Swelling (St.1) - Carbonatation (St.1) - Chimical reaction (St.1)		

Fig. 10.13 – Tabella FMEA (estratto)

Nella tabella precedente sono elencati, per ogni elemento funzionale, i modi di guasto (colonna 4), le cause (colonna 5) e gli effetti (colonne 6 e 7).
La colonna 3 contiene un numero che consente di evidenziare la catena di degradi, senza peraltro fornire indicazioni di natura temporale tra due differenti scenari. In altre parole, il modo di guasto relativo allo stage "i" richiede l'accadimento del modo di guasto relativo allo stage "i-1" solo per un determinato scenario (essendo subordinato temporalmente esclusivamente a quest'ultimo).
In particolare il valore "0" indica i possibili guasti che possono avvenire prima della fase gestionale dell'opera, più in particolare durante le fasi decisionale ed esecutiva del processo edilizio. Un valore pari ad "1" indica invece guasti dovuti direttamente all'aggressione dell'elemento da parte dell'ambiente stesso, mentre valori superiori indicano che il guasto è sopraggiunto a seguito di precedenti degradi.
Per una maggiore comprensione degli scenari, la tabella ottenuta a valle dell'applicazione dello FMEA viene tradotta in un grafo sinottico ("Event Driven Graph"), contenente tutte le informazioni raccolte nel corso dell'intero processo e necessarie alla visione generale dell'evoluzione dei degradi (**fig. 10.14**).
Ad ogni blocco sono associati quattro tipi di informazioni, in particolare:

- Il modo di guasto (zona inferiore);
- La collocazione temporale del guasto (zona superiore sinistra);
- La funzione interessata dal modo di guasto (zona superiore centrale);
- L'elemento funzionale coinvolto (zona superiore destra).

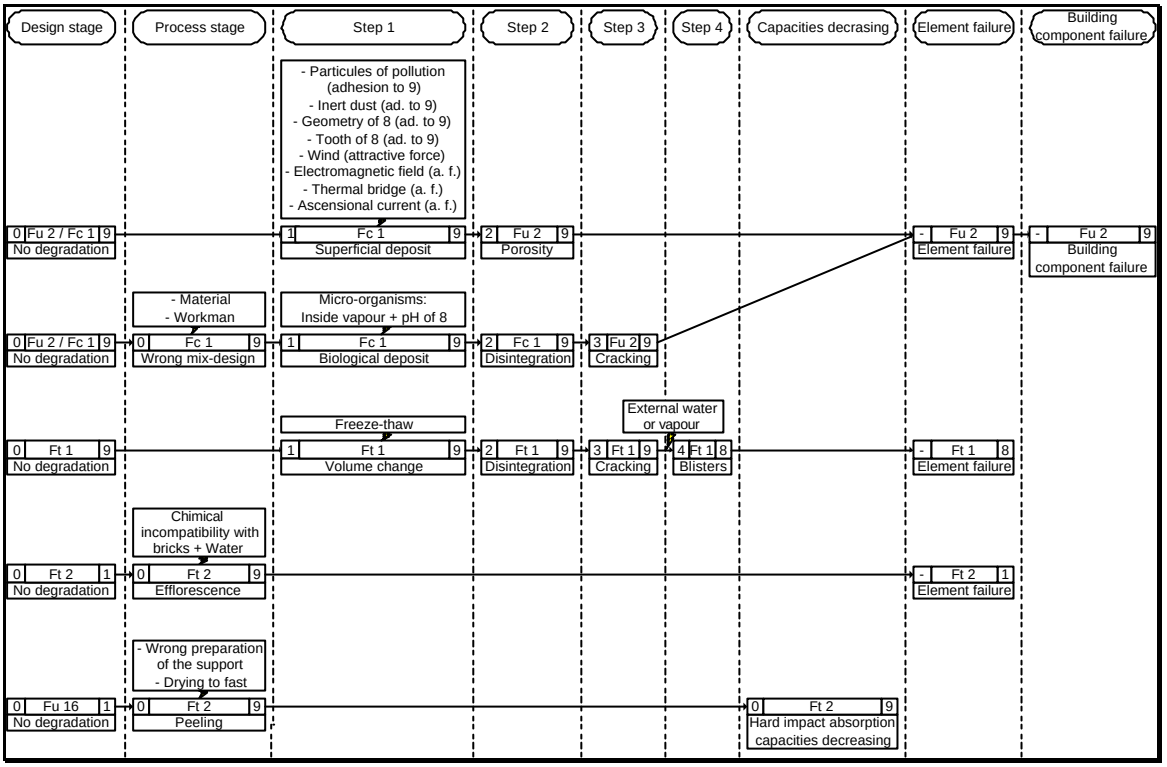

Fig. 10.14 – Event Driven Graph (estratto)

Nel grafo possono inoltre comparire informazioni circa le cause che portano al modo di guasto. La terz'ultima colonna fornisce indicazioni sulla possibile riduzione (o perdita) di alcune proprietà dell'elemento funzionale, mentre le ultime identificano il tipo di guasto finale, che può riguardare tanto l'elemento funzionale (colonna 8 della figura precedente) quanto l'intera soluzione tecnica (colonna 9). Ricordiamo che per quanto detto in precedenza il non soddisfacimento di una funzione "tecnica" comporta il non funzionamento del solo elemento funzionale ad essa associato, mentre il non soddisfacimento di una funzione "base" od "utente" si traduce nell'entrata in crisi dell'intero pacchetto tecnologico.

10.5 FMECA e la valutazione della gravità degli scenari

La natura dello FMEA, come già detto, è prettamente qualitativa e pertanto il metodo non è in grado di fornire alcun'indicazione temporale relativa agli scenari dei degradi che vengono identificati, né tanto meno consente di associare una "intensità" ai fenomeni individuati.
Per poter fruire delle informazioni restituite da FMEA in un'ottica di programmazione gestionale dell'intervento, dunque, si impone un successivo passaggio, che comporta una valutazione del rischio indotto da uno scenario, dalla mancata manutenzione di un edificio, ovvero di alcune sue parti specifiche.
Questa valutazione richiede un'analisi integrata di due differenti aspetti, secondo la concezione classica del rischio:

- Un'analisi relativa alla gravità (o entità);
- Un'analisi relativa alla probabilità di accadimento (o frequenza).

Questo secondo tipo di indagine, questa volta quantitativa e tesa ad individuare gli scenari più critici, richiede l'applicazione di uno strumento di supporto a FMEA, noto come FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis).
La **figura 10.15** mostra l'architettura di FMECA, che si integra naturalmente sullo strumento precedentemente illustrato.

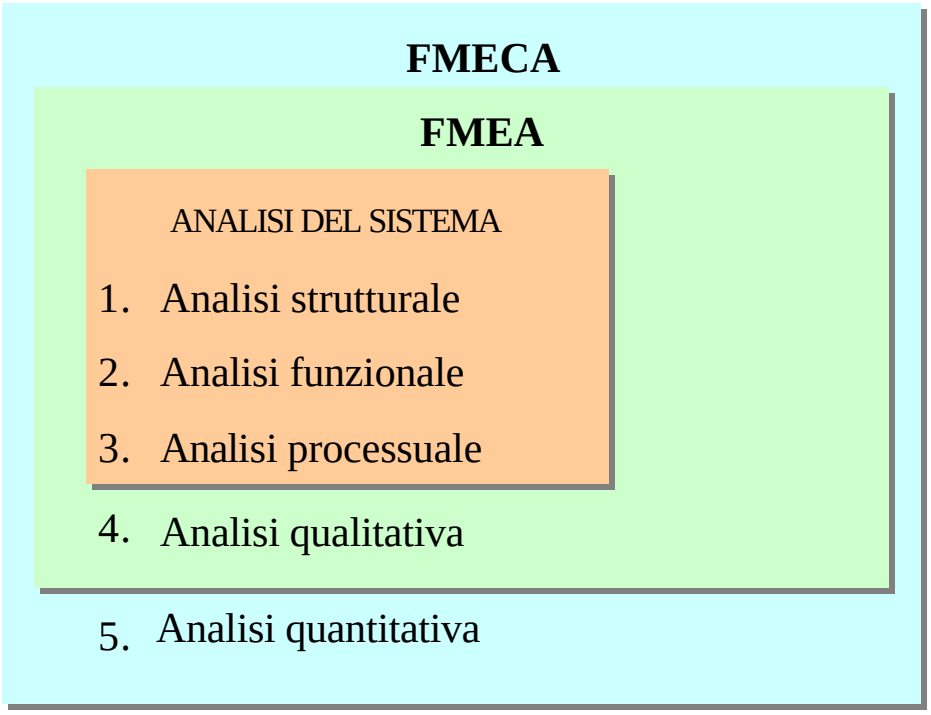

Fig. 10.15 – Integrazione dello FMEA attraverso un'indagine quantitativa: FMECA

Tali valutazioni dovrebbero consentire l'individuazione dei componenti o subsistemi effettivamente ad elevata criticità, sui quali focalizzare l'attenzione durante la fase di programmazione manutentive; questo passaggio, peraltro, si rende tanto più necessario quanto maggiore ed articolata risulta essere la lista degli scenari restituita da FMEA.

La metodologia proposta, tuttavia, adotta un approccio che si scosta da quello seguito all'interno del CSTB, costituendo un punto d'incontro tra la realtà italiana e quella transalpina; pertanto quest'analisi delle criticità va interpretata nell'accezione più ampia del termine, intendendo con "FMECA" una delle possibili procedure per l'analisi delle criticità da applicare a valle dello FMEA.
In questa sede, difatti, verranno indicati strumenti e linee guida in grado di compiere siffatta indagine, al fine di poter individuare una gerarchizzazione degli innumerevoli scenari restituiti da FMEA. Come già detto, uno strumento del genere si rivelerebbe di estrema importanza nell'adozione di un metodo in grado di restituire una così vasta (e di conseguenza poco gestibile) quantità di informazioni.

Indicazioni che consentano al progettista di stimare la maggiore o minore gravità di determinati scenari, affiancate ad indicazioni temporali in merito alle frequenze di suddette fenomeniche, renderebbero più agevole le scelte delle strategie manutentive più idonee.
Le seguenti pagine illustreranno una metodologia proposta per valutare uno dei due aspetti legati alla criticità degli scenari di degrado, ossia la valutazione della loro gravità.
Avendo ben presenti le finalità di quest'analisi (compiere una selezione degli scenari di degrado più critici al fine di sviluppare corrette strategie manutentive), abbiamo reputato utile valutare la gravità di siffatti scenari attraverso l'adozione di due indici:

a) **IG_1 (Indice funzionale):** al fine di correlare lo scenario di degrado con l'importanza della funzione non più garantita al termine della catena di eventi che porta al non funzionamento dell'elemento funzionale (o dell'intera soluzione tecnica);

b) **IG_2 (Indice manutentivo):** al fine di correlare lo scenario di degrado con la complessità dell'intervento manutentivo richiesto per ripristinare il corretto funzionamento della parte interessata dal degrado.

10.6 IG_1 – Il primo indice di gravità (o indice funzionale)

Il primo parametro, che chiameremo sinteticamente **IG_1** (indice di gravità n° 1, o **indice funzionale**), consente di attribuire un valore più o meno elevato agli scenari evidenziati dallo FMEA in base alle funzioni compromesse a seguito di un processo di degrado. L'idea muove dal fatto che per il progettista ogni intervento è un'opera unica e, in qualche modo, irripetibile. La peculiarità di ogni struttura, per il contesto ambientale e socio-economico in cui sorgerà, per la tipologia dell'utente finale e delle tecnologie adottate farà sì che di volta in volta il progettista debba focalizzare la sua attenzione su particolari caratteristiche del progetto, veri e propri punti di forza dell'edificio da lui concepito.
Con queste premesse risulta importante correlare gli scenari restituiti da FMEA con specifiche funzioni la cui importanza è stata precedente determinata dal progettista stesso, passando attraverso una prima ponderazione possibile grazie ai requisiti essenziali (cfr. **fig. 10.16**).

I principali passaggi che caratterizzano la determinazione dell'indice funzionale IG_1 sono di seguito riportati:

1) Assegnazione delle specifiche funzioni ad ogni requisito essenziale;
2) Determinazione dell'importanza relativa di ogni requisito essenziale nello specifico progetto d'intervento;
3) Valutazione dell'importanza relativa di ogni funzione per ogni elemento funzionale.

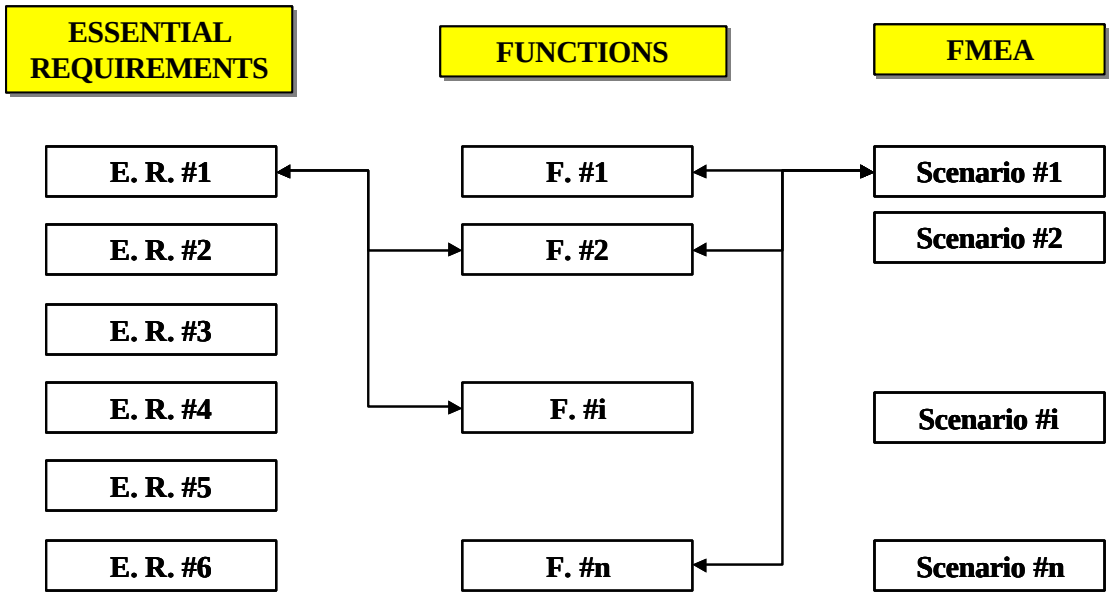

Fig. 10.16 – Correlazione tra requisiti essenziali, funzioni e scenari

10.6.1 Assegnazione delle specifiche funzioni ad ogni requisito essenziale

Si tratta di correlare i Requisiti Essenziali della Direttiva Europea "Prodotti da Costruzione" con le specifiche funzioni; tale passaggio può essere fatto una volta per tutte per ogni classe di elementi tecnici. Per comodità del lettore vengono riproposti i requisiti essenziali introdotti dalla Direttiva 89/106/EEC [EU 1988]:

1) Resistenza meccanica e stabilità;
2) Sicurezza in caso di incendio;
3) Igiene, salute e ambiente;
4) Sicurezza nell'impiego;
5) Protezione contro il rumore;
6) Risparmio energetico e ritenzione di calore.

La seguente **tab. 10.17** mostra la correlazione tra le funzioni caratterizzanti la soluzione tecnica studiata e appartenente alla classe di elementi tecnici "pareti perimetrali verticali".

FMEA Functions		CPD Requirements					
Ref.	Name	Mechanical resistance and stability	Safety in case of fire	Hygiene, health and environment	Safety in use	Protection against noise	Energy economy and heat retention
Fu1	To be tight to the liquid			X			X
Fu2	To be tight to the vapour			X			X
Fu3	To be tight to the gas		X	X			X
Fu4	To be tight to the animal and bacteria			X			
Fu5	To be tight to vegetable			X			
Fu6	To be tight to the hail			X			
Fu7	To be tight to the snow			X			

Fu8	To absorb the solar radiation (heat)				X		X
Fu9	To absorb the high temperature						X
Fu10	To absorb the low temperature						X
Fu11	To absorb the external air noise					X	
Fu12	To absorb the internal air noise					X	
Fu13	To absorb the impact noise on floor					X	
Fu14	To absorb the machinery noise					X	
Fu15	To absorb the wind effect	X					
Fu16	To absorb the hard impact	X					
Fu17	To absorb the limp impact	X					
Fu18	To transmit the loads	X					
Ft1	To resist to the liquid			X			
Ft2	To resist to the vapour			X			
Ft3	To resist to the gas			X			
Ft4	To resist to the radiation			X			
Ft5	To resist to the fire	X	X	X			
Ft6	To resist to the high temperature		X	X			
Ft7	To resist to the low temperature			X			
Ft8	To resist to the thermal shock		X	X			
Ft9	To resist to the cyclic temperature			X			
Ft10	To resist to the vertebrate			X			
Ft11	To resist to the unvertebrate			X			
Ft12	To resist to the bacteria			X			
Ft13	To resist to the vegetable			X			
Ft14	To resist to the external air noise	X					
Ft15	To resist to the internal air noise	X					
Ft16	To resist to the impact noise on floor	X					
Ft17	To resist to the machinery noise	X					
Ft18	To resist to the load	X					
Ft19	To resist to the compression effort	X			X		
Ft20	To resist to the tractive effort	X			X		
Ft21	To resist to the flexion effort	X			X		
Ft22	To resist to the shear effort	X			X		
Ft23	To resist to the pressure	X			X		
Ft24	To resist to the vibration	X					
Ft25	To resist to the friction			X			
Ft26	To resist to the hard impact	X			X		
Ft27	To resist to the limp impact	X			X		
Ft28	To resist to the wind	X					
Ft29	To hold in position	X			X		
Ft30	To glue	X					
Ft31	To resist to the precipitation			X			
Fc1	To be conform to demands	X	X	X	X	X	X
Fc2	To be conform to standards	X	X	X	X	X	X

Tab. 10.17 – Attribuzione delle funzioni ai requisiti essenziali

10.6.2 Determinazione dell'importanza relativa di ogni requisito essenziale

A questo punto è necessario riempire una matrice di confronto a coppie al fine di stabilire una gerarchizzazione dei sei requisiti essenziali (**fig. 10.18**); in questo passaggio (così come in ogni situazione in cui tale matrice viene adottata), i confronti tra i differenti requisiti rappresentano scelte progettuali ben precise, dipendenti da considerazioni circa i punti già illustrati in precedenza (§ 8.2.6).
Tale passaggio è stato pensato per conferire maggiore "dignità" a scenari altrimenti trascurabili. Una classificazione "assoluta" (che chiaramente vedrebbe prevalere i requisiti R1 e R2) farebbe sì che vengano selezionati per maggiore gravità principalmente scenari associati a problemi strutturali; bisogna invece pensare che nella maggioranza dei casi la manutenzione è di tipo ordinario, e comporta interventi su elementi esterni e non strutturali (per ripristinare situazioni di non funzionamento dovute ad infiltrazioni o a problemi termo-acustici). In considerazione di ciò, amplificare l'importanza di taluni requisiti consentirà al progettista di programmare la manutenzione in modo più flessibile e maggiormente rispondente alle reali esigenze dell'utenza finale[73].

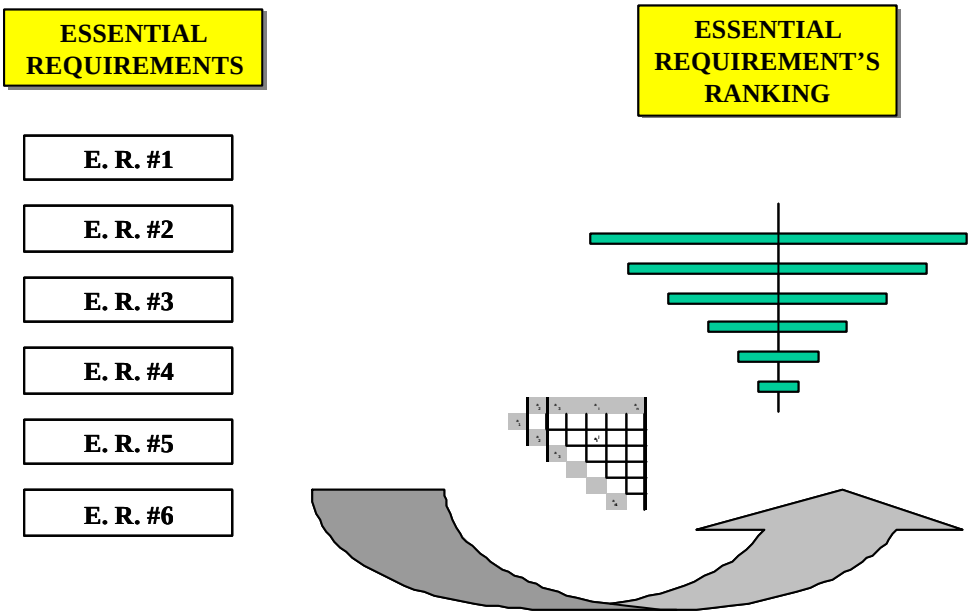

Fig. 10.18 – Ranking dei sei requisiti essenziali

La **figura 10.19** mostra la matrice di confronto a coppie che ha consentito di determinare la priorità dei diversi requisiti essenziali, applicata al caso di un'opera di edilizia residenziale.

[73] Per esempio, l'applicazione della metodologia alla progettazione di un'unità ospedaliera dovrebbe attribuire grande importanza al requisito essenziale R3 "Igiene, salute ed ambiente", che al contrario potrebbe essere considerato poco rilevante nel caso di realizzazione di un'opera infrastrutturale.

	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
R_1	R_1R_2	R_3^2	R_4^1	R_5^2	R_6^1
R_2		R_3^2	R_4^1	R_5^2	R_6^1
R_3			R_3^1	R_3R_5	R_3^1
R_4				R_5^1	R_4R_6
R_5					R_5^1

Fig. 10.19 – Matrice di confronto a coppie per la gerarchizzazione dei requisiti essenziali

Dopo la compilazione della tabella sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- R1 (Resistenza meccanica e stabilità): **1 punto**;
- R2 (Sicurezza in caso di incendio): **1 punto**;
- R3 (Igiene, salute ed ambiente): **7 punti**;
- R4 (Sicurezza nell'impiego): **3 punti**;
- R5 (Protezione contro il rumore): **7 punti**;
- R6 (Risparmio energetico e ritenzione del calore): **3 punti**.

Il peso dei sei requisiti essenziali è rappresentato qualitativamente attraverso la **fig. 10.20**.

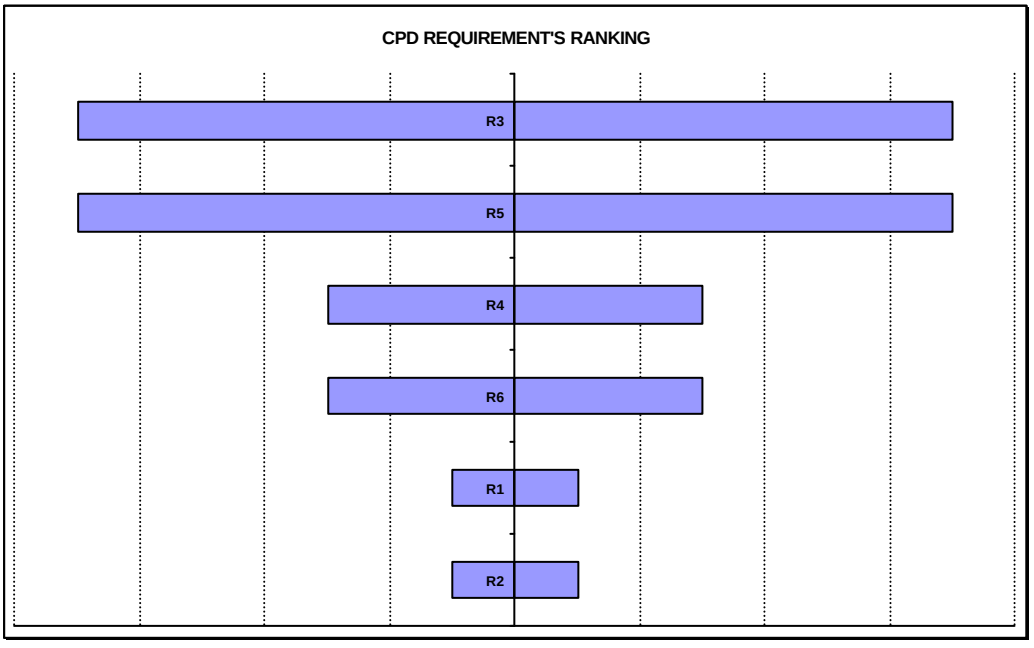

Fig. 10.20 – Importanza relativa dei sei requisiti essenziali

10.6.3 Valutazione dell'importanza relativa di ogni funzione per ogni elemento funzionale

Sempre attraverso matrici di confronto a coppie, per ogni elemento funzionale, è necessario individuare delle "priorità funzionali" sulla base delle quali valutare la gravità degli scenari restituiti da FMEA (**fig. 10.21**).

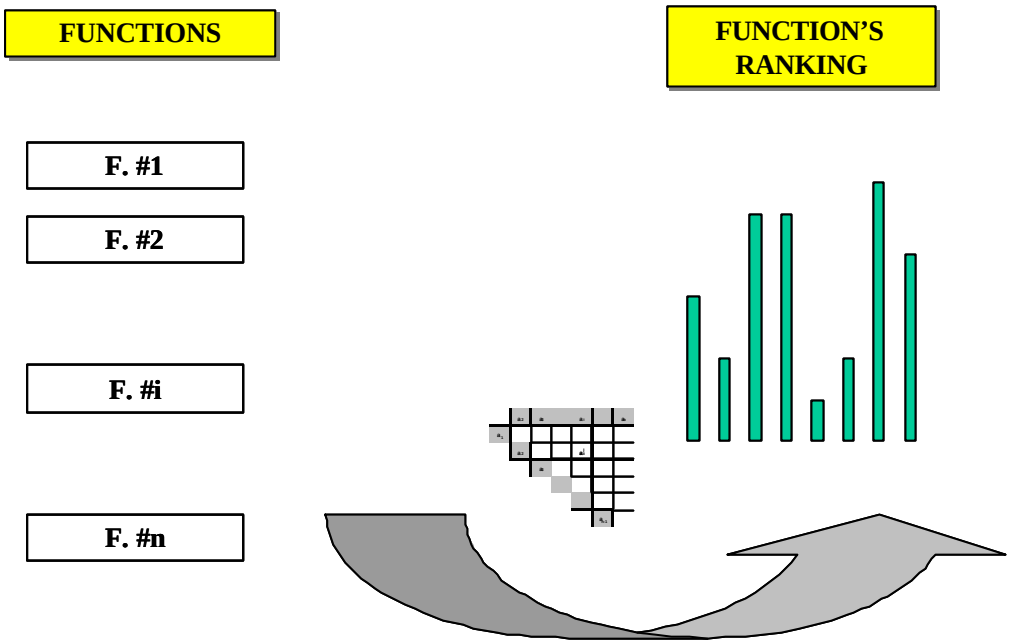

Fig. 10.21 – Ranking delle funzioni (da compiere per ogni specifico strato)

Questo passaggio va ripetuto per tutti gli elementi funzionali costituenti la soluzione tecnica, dal momento che le "priorità funzionali" variano da strato a strato[74].
Grazie alla precedente correlazione (requisiti essenziali – funzioni) il progettista è ora in grado di compilare, per ogni requisito essenziale, una matrice di confronto a coppie le cui dimensioni dipenderanno dal numero di funzioni associate allo specifico requisito considerato.
La **fig. 10.22** mostra la matrice relativa al requisito essenziale R2 ("Sicurezza in caso di incendio"), cui sono state associate le funzioni caratterizzate dai codici Fu3, Ft5, Ft6, Ft8, Fc1 e Fc2. L'esempio si riferisce all'elemento funzionale "muratura esterna".

[74] Ad esempio, nel caso di un'analisi condotta sul rivestimento protettivo un confronto tra le funzioni Fu1 (To be tight to liquid) ed Fu8 (To adsorb solar radiation) si risolverebbe chiaramente a favore della prima funzione, mentre nel caso dell'elemento funzionale "muratura esterna" la gerarchia d'importanza sarebbe completamente ribaltata.

	Ft5	Ft6	Ft8	Fc1	Fc2
Fu3	$Ft5^{2}$	$Ft6^{1}$	$Ft8^{1}$	$Fc1^{1}$	$Fc2^{2}$
	Ft5	$Ft5^{1}$	$Ft5^{1}$	$Ft5^{1}$	Ft5Fc2
		Ft6	Ft6Ft8	Ft6Fc1	$Fc2^{1}$
			Ft8	Ft8Fc1	$Fc2^{1}$
				Fc1	$Fc2^{1}$

Fig. 10.22 – Esempio di matrice di confronto a coppie per il requisito R2

Dal momento che il numero di funzioni associate ad un requisito essenziale potrebbe essere particolarmente elevato (nel caso del requisito R3 le funzioni associate sono 24, per un totale di ben 276 confronti), si può pensare di adottare un approccio leggermente differente, attraverso la definizione di tre macroclassi in cui far confluire funzioni poco importanti, mediamente importanti o il cui soddisfacimento e da noi ritenuto fondamentale.
Qualora si procedesse in questa direzione, i punteggi ottenuti sarebbero esclusivamente dipendenti dal numero delle funzioni appartenenti alle tre classi d'importanza. Ciò, peraltro, consentirebbe di bypassare l'onerosa compilazione delle matrici, adottando il più semplice algoritmo di seguito riportato:

- $P_{Low} = F_{Low} - 1$
- $P_{Medium} = (F_{Medium} - 1) + F_{Low}$
- $P_{High} = (F_{High} - 1) + 2 * F_{Low} + F_{Medium}$

Dove:

P_{Low} = Punteggio attribuito alle funzioni meno importanti;

P_{Medium} = Punteggio attribuito alle funzioni mediamente importanti;

P_{High} = Punteggio attribuito alle funzioni più importanti;

F_{Low} = Numero di funzioni analitiche appartenenti alla macroclasse "Low importance";

F_{Medium} = Numero di funzioni analitiche appartenenti alla macroclasse "Medium importance";

F_{High} = Numero di funzioni analitiche appartenenti alla macroclasse "High importance".

Un esempio consentirà di comprendere meglio quanto esposto.
Attraverso la **tabella 10.23** è stato attribuito un grado di importanza alle diverse funzioni da comparare, sfruttando l'adozione di tre macroclassi. L'elemento funzionale indagato in questo caso è il film protettivo.

		IMPORTANCE		
		LOW	**MEDIUM**	**HIGH**
FUNCTIONS	Fu1			X
	Fu2	X		
	Fu3	X		
	Fu4			X
	Fu5			X
	Fu6			X
	Fu7			X
	Ft1			X
	Ft2	X		
	Ft3	X		
	Ft4			X
	Ft5	X		
	Ft6			X
	Ft7			X
	Ft8		X	
	Ft9		X	
	Ft10		X	
	Ft11		X	
	Ft12		X	
	Ft13		X	
	Ft25	X		
	Ft31			X
	Fc1			X
	Fc2			X

Tab. 10.23 – Attribuzione dell'ordine d'importanza per macroclassi: film protettivo

Così facendo, i 276 confronti necessari per applicare la matrice di confronto al requisito essenziale R3 verrebbero eliminati; il risultato sarebbe, più semplicemente, il seguente:

- $P_{Low} = F_{Low} - 1 = 6 - 1 = 5$
- $P_{Medium} = (F_{Medium} - 1) + F_{Low} = (6 - 1) + 6 = 11$
- $P_{High} = (F_{High} - 1) + 2 * F_{Low} + F_{Medium} = (12 - 1) + 2 * 6 + 6 = 29$

con un risparmio di tempo "parabolico" via via che il numero di funzioni cresce[75]!

Il prezzo da pagare per l'adozione di questo metodo è la scarsa distribuzione di valori legati alle funzioni, giacché l'intero spettro dei punteggi si riduce a tre sole grandezze.

[75] Difatti, indicando con N_f il numero complessivo di funzioni analitiche e con N_c il numero di combinazioni, la relazione che lega queste due grandezze è data da $N_c = N_f * (N_f - 1) / 2$ che, in un piano N_f, N_c, è rappresentata da una parabola.

D'altro canto, questo modo di procedere elimina l'incertezza connessa alla compilazione di matrici particolarmente articolate, giacché non sempre le scelte potranno essere compiute attraverso criteri chiari e codificati.
Per ogni elemento funzionale questi passaggi andranno ripetuti sei volte, tante quanti sono i requisiti essenziali.

Un ulteriore passaggio prima di ricavare il fattore IG_1 è quello della normalizzazione dei punteggi in scala $0 - 1$, resa necessaria dal differente numero di funzioni associate ai requisiti essenziali (**tab. 10.24**). In caso contrario, difatti, i confronti risulterebbero falsati dal fatto che inevitabilmente insiemi particolarmente numerosi di funzioni otterrebbero valori particolarmente elevati, a prescindere dal grado d'importanza delle funzioni stesse.

	LOW IMPORTANCE	**MEDIUM IMPORTANCE**	**HIGH IMPORTANCE**
VALUE	5	11	29
NORMALIZED VALUE	0,17	0,38	1

Tab. 10.24 – Requisito Essenziale R3, film protettivo: normalizzazione dei punteggi

La **tabella 10.25** rappresenta il quadro generale associato all'elemento funzionale "film protettivo", che consente di ricavare l'indice funzionale IG_1.

FMEA Functions		**CPD Requirements**					
Ref.	Name	Mechanical resistance and stability	Safety in case of fire	Hygiene, health and environment	Safety in use	Protection against noise	Energy economy and heat retention
CPD	**Weight**	**1**	**1**	**7**	**3**	**7**	**3**
Fu1	To be tight to the liquid			1			1
Fu2	To be tight to the vapour			0,17			0,11
Fu3	To be tight to the gas		1	0,17			0,11
Fu4	To be tight to the animal and bacteria			1			
Fu5	To be tight to vegetable			1			
Fu6	To be tight to the hail			1			
Fu7	To be tight to the snow			1			
Fu8	To absorb the solar radiation (heat)				0,15		0,44
Fu9	To absorb the high temperature						0,44
Fu10	To absorb the low temperature						0,44
Fu11	To absorb the external air noise					0,38	
Fu12	To absorb the internal air noise					0,25	
Fu13	To absorb the impact noise on floor					0,25	
Fu14	To absorb the machinery noise					0,25	
Fu15	To absorb the wind effect	0,34					
Fu16	To absorb the hard impact	1					
Fu17	To absorb the limp impact	1					
Fu18	To transmit the loads	0,34					
Ft1	To resist to the liquid			1			
Ft2	To resist to the vapour			0,17			
Ft3	To resist to the gas			0,17			
Ft4	To resist to the radiation			1			
Ft5	To resist to the fire	0,34	0	0,17			

Ft6	To resist to the high temperature		0,33	1			
Ft7	To resist to the low temperature			1			
Ft8	To resist to the thermal shock		0,33	0,38			
Ft9	To resist to the cyclic temperature			0,38			
Ft10	To resist to the vertebrate			0,38			
Ft11	To resist to the unvertebrate			0,38			
Ft12	To resist to the bacteria			0,38			
Ft13	To resist to the vegetable			0,38			
Ft14	To resist to the external air noise	0,34					
Ft15	To resist to the internal air noise	0,34					
Ft16	To resist to the impact noise on floor	0,34					
Ft17	To resist to the machinery noise	0,34					
Ft18	To resist to the load	0,34					
Ft19	To resist to the compression effort	1			1		
Ft20	To resist to the tractive effort	1			1		
Ft21	To resist to the flexion effort	0,4			0,31		
Ft22	To resist to the shear effort	0,4			0,31		
Ft23	To resist to the pressure	0,34			0,15		
Ft24	To resist to the vibration	0,34					
Ft25	To resist to the friction			0,17			
Ft26	To resist to the hard impact	1			1		
Ft27	To resist to the limp impact	1			1		
Ft28	To resist to the wind	0,34					
Ft29	To hold in position	0,34			0,15		
Ft30	To glue	0,34					
Ft31	To resist to the precipitation			1			
Fc1	To be conform to demands	1	1	1	1	1	1
Fc2	To be conform to standards	1	1	1	1	1	1

Tab. 10.25 – Film protettivo: punteggi normalizzati e pesi dei requisiti essenziali

Il progettista è ora in grado di compiere una valutazione dell'importanza di ogni funzione, associata ai differenti elementi funzionali costituenti la soluzione tecnica. Il primo indice di gravità IG_1 sarà ottenuto attraverso una somma pesata, in cui viene tenuto in considerazione anche il differente peso che è stato attribuito ai sei requisiti essenziali.
La seguente formula consente di ricavare il primo indice di gravità IG_1 relativo ad una specifica funzione "i".

$$IG1_i = \sum_{j=1}^{6} P_{i,j} * R_j$$

Dove:

$P_{i,j}$ = Punteggio della i-esima funzione analitica, relativo al j-esimo requisito essenziale;
R_j = Peso del j-esimo requisito essenziale.

Finalmente la **figura 10.26** illustra la classificazione (in scala 0 – 1) delle funzioni relative allo strato protettivo più esterno della soluzione tecnica considerata, la chiusura pluristrato.

Il valore massimo (pari a 1) è stato attribuito alla funzione Fu1, "tagliando" di fatto le code delle funzioni fondamentali Fc1 e Fc2 che, per come sono state definite, avrebbero di fatto abbattuto verso il basso i valori di tutte le altre funzioni.

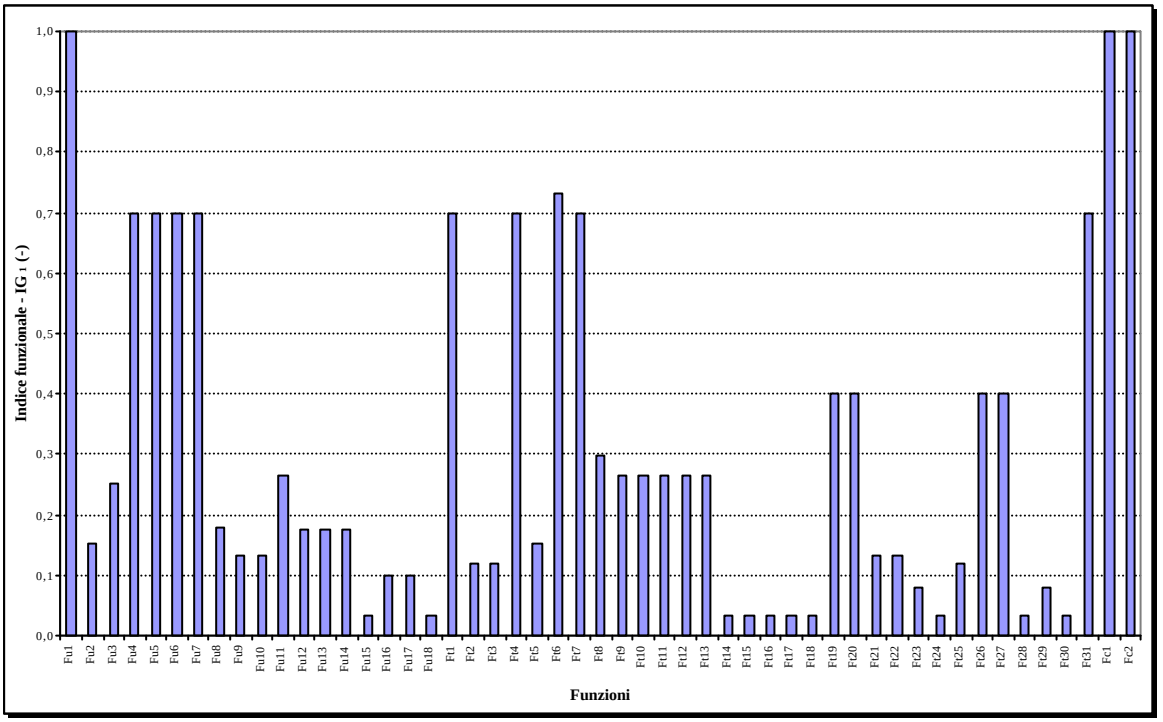
Indice funzionale - IG 1 (-)
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
Fu1 Fu2 Fu3 Fu4 Fu5 Fu6 Fu7 Fu8 Fu9 Fu10 Fu11 Fu12 Fu13 Fu14 Fu15 Fu16 Fu17 Fu18 Ft1 Ft2 Ft3 Ft4 Ft5 Ft6 Ft7 Ft8 Ft9 Ft10 Ft11 Ft12 Ft13 Ft14 Ft15 Ft16 Ft17 Ft18 Ft19 Ft20 Ft21 Ft22 Ft23 Ft24 Ft25 Ft26 Ft27 Ft28 Ft29 Ft30 Ft31 Fc1 Fc2
Funzioni

Fig. 10.26 – Valutazione del primo indice di gravità IG_1 per lo strato "film protettivo"

Procedendo in maniera analoga si addiverrà allo stesso tipo di classificazione per i rimanenti strati.

10.7 IG_2 – Il secondo indice di gravità (o indice manutentivo)

Il secondo, importante aspetto che abbiamo ritenuto importante tenere in considerazione per poter utilizzare FMEA come strumento di ausilio nella programmazione della manutenzione è la valutazione della complessità degli interventi manutentivi.
Tali operazioni si rendono necessarie, qualora vada ripristinato il corretto funzionamento di un elemento funzionale che, a valle di una catena di degradi, risulta non più adeguato a svolgere i compiti per i quali è stato progettato e realizzato.
Al fine di valutare questo secondo indice IG_2, i passaggi da compiere sono i seguenti:

1) Correlare ogni scenario con un intervento manutentivo complesso;
2) Suddividere ogni intervento manutentivo complesso in più interventi semplici;
3) Valutare la complessità dei singoli interventi;
4) Ricavare il secondo indice di gravità per ogni intervento manutentivo complesso.

La procedura proposta non entra volutamente nel merito di come determinare tale indice, fornendo piuttosto delle linee guida e delle indicazioni utili per ulteriori approfondimenti, consci del fatto che siffatta analisi andrebbe svolta più approfonditamente con ragionamenti, strumenti e tempi che non possono esaurirsi nel corso di questo lavoro.

10.7.1 Correlare ogni scenario con un intervento manutentivo complesso

Abbiamo visto come FMEA sia in grado di restituire scenari associati sia ad un determinato elemento funzionale, sia alla funzione che viene a mancare a causa di una successione di degradi. Tale passaggio quindi non dovrebbe comportare particolari difficoltà.
Al termine di uno scenario potrebbe essere necessario, ad esempio, intervenire sull'intonaco esterno ormai ammalorato, al fine di realizzarne uno completamente nuovo (intervento manutentivo complesso).

10.7.2 Suddividere ogni intervento manutentivo complesso in più interventi semplici

Un intervento manutentivo può essere visto come una serie di interventi manutentivi più semplici. Se è vero che il numero di scenari è particolarmente elevato, è altrettanto vero che il numero di interventi manutentivi semplici sarà molto più ridotto, giacché gran parte di essi saranno simili. Nel caso precedente, ad esempio, l'intervento manutentivo complesso individuato sarà scomposto nelle seguenti attività manutentive semplici:

1) Rimozione dell'intonaco esterno ammalorato;
2) Realizzazione del nuovo intonaco esterno;
3) Realizzazione del film protettivo.

10.7.3 Valutare la complessità dei singoli interventi

Per la valutazione di ogni intervento manutentivo semplice andranno tenuti in considerazione numerosi fattori quali, ad esempio, il numero di operatori necessari, il loro grado di esperienza, la necessità di adottare strumentazione specifica, il tempo richiesto per compiere l'intervento, …
Per tutte queste informazioni peraltro, si può attingere alla documentazione elaborata durante la fase di progettazione operativa dell'intervento edilizio, fondamentale per una corretta programmazione dei tempi e dei costi dell'intervento, per l'organizzazione del cantiere, nonché per la redazione dei piani di sicurezza.
Tali informazioni consentirebbero di valutare per ogni intervento manutentivo semplice, il suo grado di manutenibilità, attraverso un'indagine qualitativa dei sei aspetti che governano la manutenibilità (cfr. cap. 6):

- Ispezionabilità;
- Accessibilità;
- Distinguibilità;
- Smontabilità;
- Riparabilità;
- Sostituibilità.

Un primo strumento di ausilio nella determinazione di tali aspetti potrebbe essere un foglio elettronico[76] contenente una serie di criteri, sulla scorta dei quali il progettista è accompagnato nella determinazione (per quanto qualitativa) del grado di manutenibilità del singolo intervento. La **tab. 10.27** riporta un estratto del foglio, contenente i criteri presi in considerazione per valutare gli aspetti che governano il requisito di manutenibilità.

[76] Elaborato dalla prof.ssa Rejna e dall'ing. Re Cecconi

ISPEZIONABILITA'
Soluzione ispezionabile direttamente o dopo lo smontaggio di altre parti
Dimensione dei passaggi per l'ispezione
Tipo di controlli da effettuare per verificarne il funzionamento
Qualifica degli operatori addetti al controllo
Numerosità dei controlli da effettuare per verificarne il funzionamento
Numerosità delle operazioni elementari per ogni singolo controllo
Sicurezza del luogo di lavoro
ACCESSIBILITA'
Soluzione accessibile direttamente o dopo lo smontaggio di altre parti
Necessità di mezzi e/o attrezzature per l'accesso alla struttura
Esistenza di mezzi o attrezzature predisposti in loco per facilitare l'accesso all'elemento
Numero di lati da cui la soluzione è accessibile
Necessità di impedire la fruizione degli spazi attigui alla soluzione tecnica durante l'ispezione
Dimensione dei passaggi di accesso alla soluzione
Postura degli operatori secondo l'altezza
Postura degli operatori secondo il tempo di impegno muscolare
Qualifica degli operatori addetti alla pulizia
DISTINGUIBILITA'
Numerosità dei componenti costituenti la soluzione tecnica
Presenza di indicatori, cartellini o targhette identificative
Elemento identificabile con attrezzature specializzate o direttamente identificabile
SMONTABILITA'
Numerosità delle connessioni
Reversibilità delle connessioni
Qualifica degli operatori addetti allo smontaggio
Numerosità degli operatori necessari per lo smontaggio
Necessità di attrezzature specializzate per lo smontaggio
Postura degli operatori secondo l'altezza
Postura degli operatori secondo il tempo di impegno muscolare
Sicurezza del luogo di lavoro
Peso delle parti costituenti la soluzione
Dimensioni delle parti costituenti la soluzione
Necessità di trasportare le parti smontate
Presenza di predisposizioni per il trasporto
Disponibilità alla movimentazione manuale
Necessità di impedire la fruizione degli spazi attigui alla soluzione tecnica
RIPARABILITA'
Luogo dove è possibile effettuare la riparazione
Interruzione di servizio durante la riparazione
Peso delle parti costituenti la soluzione
Dimensioni delle parti costituenti la soluzione tecnica
Disponibilità alla movimentazione manuale
Qualifica degli operatori addetti alla riparazione
Numerosità degli operatori necessari per la riparazione
Tempo di riparazione
Postura di lavoro degli operatori secondo l'altezza
Postura di lavoro degli operatori secondo il tempo di impegno muscolare
Necessità di attrezzature specializzate
Necessità di macchinari specializzati
Tempo di lavoro macchina
Sicurezza dei mezzi d'opera necessari per la riparazione - rischi derivanti dall'uso di macchine e utensili
Sicurezza del luogo di lavoro
Necessità di impedire la fruizione degli spazi attigui alla soluzione tecnica
Necessità di proteggere le soluzioni tecniche attigue durante gli interventi di riparazione
Numerosità delle operazioni elementari necessarie per la riparazione
Numerosità degli autocontrolli
Semplicità degli autocontrolli

SOSTITUIBILITA'
Modularità delle parti costituenti la soluzione tecnica
Intercambiabilità delle parti costituenti la soluzione tecnica
Standardizzazione delle parti costituenti la soluzione tecnica
Peso delle parti costituenti la soluzione
Dimensioni delle parti costituenti la soluzione tecnica
Trasportabilità delle parti
Tempo dell'intervento

Tab. 10.27 – Criteri di valutazione della manutenibilità

Questo tipo di indagine consentirebbe di associare ad ogni intervento manutentivo semplice un indice di manutenibilità, inversamente proporzionale alla "gravità" dell'intervento.

10.7.4 Ricavare il secondo indice di gravità per ogni intervento manutentivo complesso

L'ultimo passaggio consiste nel determinare il secondo indice di gravità IG_2 per l'intervento manutentivo complesso. L'intera procedura è riassunta nella **figura 10.28**, dove:

MO = Complex maintenance operation;
mo = Simple maintenance operation;
i = 1, …, n Number of complex maintenance operations;
j = 1, …, m Number of simple maintenance operations;

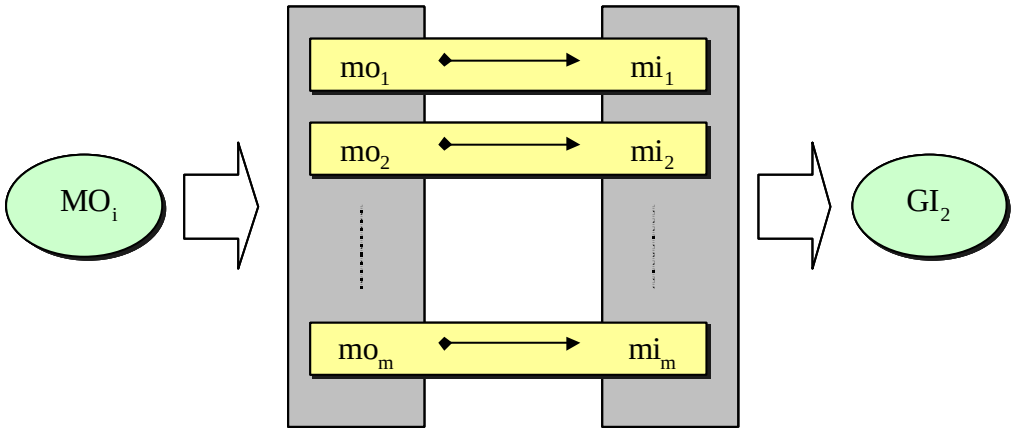

Fig. 10.28 – Procedura proposta per la valutazione del secondo indice di gravità

10.8 Sviluppi futuri della ricerca

Quanto proposto nell'ultima parte di questo capitolo mira a sviluppare un'analisi della criticità degli scenari che consenta di aiutare il progettista nella programmazione della manutenzione. In particolare la ricerca ha indagato gli aspetti legati ad uno dei due fattori che governano l'analisi delle criticità, ovvero quello legato alla determinazione della gravità degli scenari. A tale scopo sono stati individuati due possibili fattori (funzionale e manutentivo), fornendo indicazioni circa la possibilità di una loro determinazione.

Lavori futuri potrebbero mirare alla definizione di classi per i due indici, sia in termini di numero, sia in termini di ampiezza delle stesse, al fine di riuscire a realizzare e compilare una "matrice delle gravità" (**figura 10.29**).

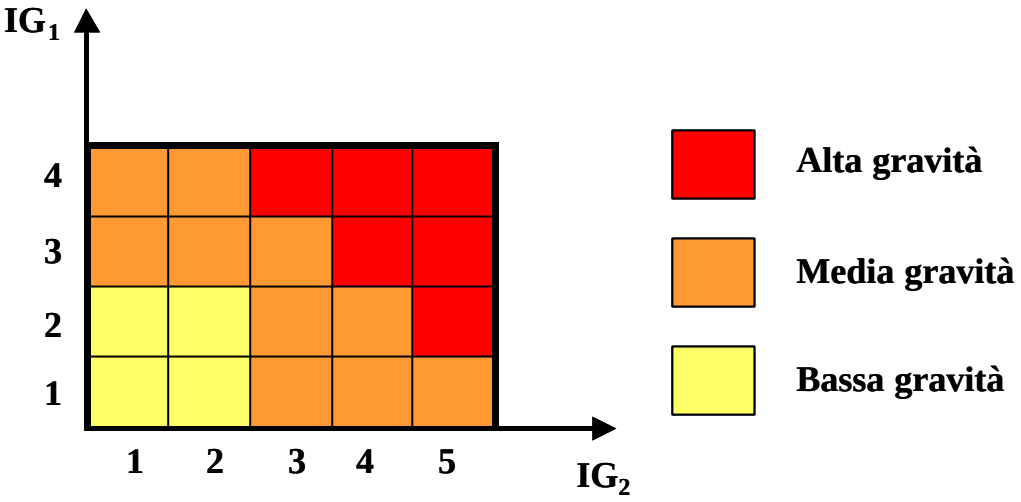

Fig. 10.29 – Esempio di una matrice delle gravità

Inoltre andranno compiuti studi sulla ripartizione delle aree di gravità, passaggio estremamente delicato, dal momento che le conseguenze di tale scelta si ripercuoteranno a valle nella determinazione degli scenari, più critici per i quali andranno previste strategie manutentive senz'altro di tipo preventivo e, possibilmente, con ispezioni tanto più frequenti quanto più elevate saranno le conseguenze del non funzionamento. E' chiaro, difatti, che una matrice come quella rappresentata in **figura 10.30** risulterà meno onerosa rispetto a quella precedente, prevedendo un minor numero di scenari ad elevata gravità; la scelta da compiere a questo punto si rivela di natura strategica, e dovrà essere accompagnata anche da considerazioni economico-finanziarie ed estimative.

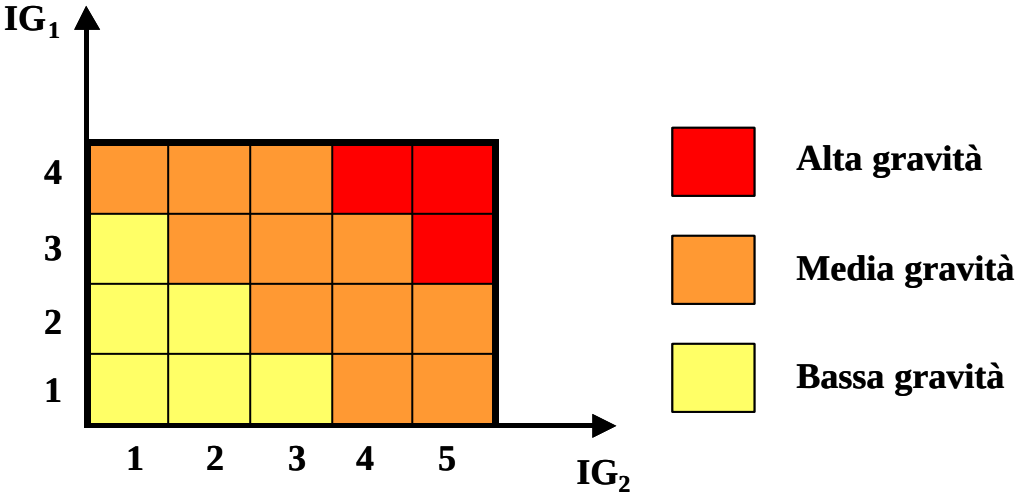

Fig. 10.30 – Matrice delle gravità: l'importanza delle aree di gravità

Parallelamente a questa ricerca sarà fondamentale dotarsi di strumenti per la determinazione delle probabilità di accadimento (o frequenze) degli scenari indagati. In questo senso le attività sperimentali volte a fornire informazioni di natura temporale saranno fondamentali, e dovranno evolvere verso strumenti di aggregazione di dati,per quanto eterogenei possano essere. E', difatti, palese la carenza di informazioni in questa direzione e, data la difficoltà di compiere estese campagne sperimentali sarà fondamentale lavorare per condividere quante più informazioni possibili. Ricordiamo che la stessa ISO 15686 prevede da un lato esposizioni in esterno a lungo termine (esposizioni in esterno di campioni di prova, ispezioni su edifici, esposizioni in edifici sperimentali ed esposizioni in condizioni d'uso) nonché esposizioni a breve termine (accelerate di laboratorio). In quest'ottica andranno promosse ed incoraggiate iniziative come quella che sta portando avanti il nostro gruppo di ricerca, elemento di coordinamento di una rete nazionale volta ad estendere i risultati ottenuti in questi anni alle principali classi di elementi tecnici di un organismo edilizio (di cui si è già detto, cfr. § 7.10).

Conclusioni generali

Quanto esposto nel corso della presente trattazione ha messo in luce come sia vasta ed articolata la questione durabilistica.
Le attività di ricerca condotte in questo triennio di dottorato hanno consentito al candidato di affrontare la tematica da più parti, attraverso differenti approcci e con gli strumenti ed i metodi più variegati, per cercare di comprendere quali e quante siano le possibili soluzioni ad un problema che appare ancora troppo intricato.
I contributi dei diversi capitoli (più precisamente quelli relativi alle parti 2 e 3), sebbene a prima vista apparentemente a se stanti, sono tenuti insieme da un sottile filo rosso, da un minimo comune denominatore che attiene alla capacità di ottenere informazioni di vitale interesse per una corretta programmazione economico/gestionale dell'intervento.
Partendo dal **capitolo 7**, difatti, è stato trattato l'aspetto della raccolta di dati di vita utile, momento fondamentale nel percorso che conduce alla determinazione della ESL di oggetti edilizi di natura più o meno complessa (interi edifici o parti di essi).
In questo senso, il lavoro compiuto a livello internazionale è considerevole, e da più parti si sente l'esigenza di creare ed accrescere banche dati. In particolare, si registra l'attività promossa dal nostro Dipartimento, coordinatore nazionale di un programma sperimentale volto ad ottenere preziose informazioni sulle principali classi di elementi tecnici. In campo europeo, un rilevante apporto è fornito dal CSTB che da anni, in modo estremamente lungimirante, raccoglie dati sui più disparati componenti edilizi; sempre al suo interno, inoltre, sono state sviluppate metodologie che consentano la comparazione tra dati anche notevolmente eterogenei tra loro, al fine di ottimizzare la scarsa quantità di informazioni ad oggi disponibile.
Il resto del lavoro indaga la capacità (e la possibilità) di fruire di siffatte informazioni, attraverso un'approfondita analisi di strumenti metodologici, i cui approcci si differenziano in modo sostanziale. L'attenzione si sposta dunque sull'implementazione di vari metodi di previsione di durata in condizioni progettuali, proprio sulla base dei dati di cui sopra.
Nel **capitolo 8** sono stati proposti contributi legati al metodo più diffuso a livello internazionale (Metodo Fattoriale), nell'intento di strumentarlo attraverso criteri di valutazione tesi a ridurne l'elevato grado di oggettività. La procedura proposta, strumentata in questa prima fase della ricerca per il solo fattore riguardante la qualità del componente, consentirebbe peraltro ad utenti "non esperti" di poter fruire della metodologia, ma per una sua applicazione prevede (quantomeno nella fase iniziale) un grosso sforzo nella creazione delle cosiddette griglie di valutazione. Così facendo, la responsabilità della correzione della RSL verrebbe demandata a persone più competenti, lasciando al progettista il semplice compito di scegliere i componenti di progetto e di valutarli in modo automatico.
Convinti tuttavia che un approccio di tipo prestazionale sia il più consono per addivenire a più corrette previsioni di vita utile, i membri del DBCG hanno recentemente sviluppato un metodo ingegneristico di stima della durata basato sulla simulazione del decadimento prestazionale nel tempo (Metodo dei Limiti Prestazionali, PLM). Tale metodologia presenta l'indiscusso vantaggio di poter essere applicata direttamente alle reali condizioni di progetto (ambientali, spaziali e tecnologiche), ma è limitata dalla necessità di disporre di curve di decadimento legate alle caratteristiche funzionali degli elementi costituenti la soluzione tecnica, ed ottenibili a valle di sperimentazioni condotte tanto in laboratorio quanto in esterno.

Il **capitolo 9** indica dunque una possibile alternativa all'utilizzo del PLM, per lo meno fino a quando tali dati di input non saranno disponibili. Il contributo mira a sfruttare PLM per la valutazione della propensione alla durata di elementi tecnici, affiancandolo al già presente metodo di stima della propensione all'affidabilità per mettere a disposizione del progettista un utile strumento nell'ottimizzazione della scelta progettuale.
Il problema di correlare il degrado di un elemento tecnico alla variabile temporale per addivenire all'istante di fina di vita utile è tipico dell'approccio prestazionale, e in questo senso le difficoltà incontrate sono analoghe a quelle dei colleghi d'oltralpe; il metodo proposto dal CSTB ed indagato nel **capitolo 10** (FMEA), richiede anch'esso un indagine quantitativa che fornisca precise tempistiche per gli scenari individuati. Su questi aspetti, sarà possibile proseguire la collaborazione poiché i due approcci rivelano simili finalità.
L'ultima parte del lavoro, infine, testimonia degli sforzi condotti per collegare quanto ripreso nelle righe precedenti alla tematica della manutenzione, naturale appendice dell'intera indagine durabilistica, le cui ricadute sono di estremo interesse per aspetti che riguardano in prima istanza la programmazione gestionale dell'opera, ma che in un'ottica più vasta toccano anche altre importanti tematiche legate alla sostenibilità dell'intervento.

Riferimenti bibliografici

- AA. VV. a cura di Maggi, P. N. (2000): *La qualità tecnologica dei componenti edilizi. La durabilità*, Epitesto, Milano.

- AA. VV. a cura di Maggi, P. N. (2001): *La qualità tecnologica dei componenti edilizi. La valutazione della durabilità. Risultati della prima fase sperimentale*, Epitesto, Milano.

- AA. VV. (2003): *L'importanza dell'isolamento degli edifici per l'ambiente – Uno studio EURIMA nei Paesi europei*, Neo Eubios n° 8, ottobre 2003.

- Aarseth, L. I. and Hovde, P. J. (1999): *A stochastic approach to the factor method for estimating service life*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Aikivuori, A. M. (1999): *Critical loss of performance – What fails before durability*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Bazzi, C. (2004): *La valutazione sperimentale della durabilità dei componenti edilizi*, degree thesis, Polytechnic of Milan, BEST Department.

- Bourke, K. and Davies, H. (1997): *Factors affecting service life predictions of buildings: a discussion paper*, Laboratory Report. Building Research Establishment, Garston, Watford, UK.

- Bourke, K. and Davies, H. (1999): *Estimating service lives using the factor method for use in whole life costing*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Brand, S. (1994): *How buildings learn. What happens after they are built?* Viking, UK.

- Breitenbüchner, R., Gehlen, C., Schiessl, P., Van den Hoonard, J., Siemes, T. (1999): *Service life design of the Western Scheldt tunnel*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Cannistaro, G., Franzitta, G., Giaconia, C. and Rizzo, G. (1992): *Algorithms for the calculation of the view factors between human body and rectangular surfaces in parallelepiped environments*, Energy and Buildings n° 19

- Coccè, G. (2004): *Contributo alla definizione delle procedure per la stima della qualità di componenti e materiali nell'ambito della ISO 15686 – Contributo all'approfondimento del metodo fattoriale*, degree thesis, Polytechnic of Milan, BEST Department.

- Cusmano, G., Lucchini, A. (2003): *Implementing the factor method for service life estimation using weighted – factors*, International Workshop on "Management of Durability in the Building Process", Milan, Italy.

- Daniotti, B., Conti, F., Helke, G. *et al.* (1990): *Ricerca sperimentale sull'applicabilità delle tecniche di identificazione dei parametri termici di edificio per scopi di certificazione*, rapporto EUR 13238, CCR Ispra.

- Daniotti, B. (2002): *Performance characteristics' degradation and paints' protective degree for wall components subject to durability tests*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Daniotti, B. (2003): *La qualità in edilizia*, CUSL, Milano.

- Daniotti, B. and Iacono, P. (2003): *Long–term degradation under outdoor exposure conditions*, International Workshop on "Management of Durability in the Building Process", Milan, Italy.

- Daniotti, B. and Iacono, P. (2005): *Evaluating the service life of external walls: a comparison between long-term and short-term expositions*, 10th DBMC, Lyon, France.

- DuraCrete Manual (2000): *The European Union, Brite EuRam III*, contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Report no. BE95-1347/R17, May 2000.

- Florentzou, F., Brandt, E. and Wetzel, C. (1999): *MEDIC – A method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Frohnsdorff, G. J., Sjöström, C. and Soronis, G. (1999): *International standards for service life planning of buildings*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Gasparoli, P. (2002): *Le superfici esterne degli edifici: degradi, criteri di progetto, tecniche di manutenzione*, Alinea, Firenze.

- Hed, G. (1998): *Service life planning in building design*, CIB World Building Congress, Gävle, Sweden.

- Hed, G. (1999): *Service life planning of building components*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Hed, G. (2000): *Service life planning in building design*. RD-report No 4. Centre for Built Environment, University of Gävle, Gävle, Sweden.

- Hovde, P. J. (1998): *Evaluation of the factor method to estimate the service life of building components*, Materials and Technologies for Sustainable Construction, CIB World Building Congress, Gävle, Sweden.

- Hovde, P. J. (2002): *The factor method for service life prediction from theoretical evaluation to practical implementation*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Iacono, P. (2001): *Correlazioni tra prestazioni ambientali e prestazioni tecnologiche dei componenti edilizi – Valutazione degli effetti del degrado dei componenti ed individuazione dei limiti prestazionali di fine di vita utile*, degree thesis, Polytechnic of Milan, BEST Department.

- Iacono, P. (2004): *Evaluating the service life of building components*, 2nd CIB Student Chapter's International Symposium, Beijing, China.

- Ishizuka, Y., Onodera, A. and Teramoto, E. (1992): *A proposal for the planning of government buildings based on their life cycle*, CIB Conference "Innovations in management, maintenance & modernization of buildings", Rotterdam, Netherlands.

- Lair, J., Le Teno, J. F. and Boissier, D. (1999): *Durability assessment of building systems*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Lair, J. (2000): *Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*, Thèse préparée au CSTB – Service matériaux et au LERMES.

- Lair, J., Chevalier, J. L. and Rilling, J. (2001): *Operational methods for implementing durability in service life planning frameworks*, CIB World Building Congress, Wellington, New Zealand.

- Lair, J. and Chevalier, J. L. (2002a): *Failure mode effect and criticality analysis for risk analysis (design) and maintenance planning (exploitation)*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Lair, J. and Chevalier, J. L. (2002b): *Service life assessment of building products by data fusion*, 1st Domain Report after 1st PeBBu Domain 1 Workshop, Gävle, Sweden.

- Lair, J., Bauer, M., Doloca, A. and Wetzel, C. (2003a): *A predictive model for future deterioration of buildings elements used in a decision making tool for long term investment strategies*, International Workshop on "Management of Durability in the Building Process", Milan, Italy.

- Lair, J., Talon, A. and Boissier, D. (2003b) : *Failure Mode Effect and Criticality Analysis for decision aid at design and exploitation stages*, Second International Symposium on Integrated Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures (ILCDES), Kuopio, Finland.

- Lounis, Z., Lacasse, M. A., Vanier, D. J. and Kyle, B. R. (1998): *Towards standardization of service life prediction of roofing membranes, Roofing Research and Standards Development*: 4th Volume, ASTM STP 1349, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.

- Maggi, P. N. (1994a): *Il processo edilizio (vol. I) – Metodi e strumenti di progettazione edilizia*, CittàStudi, Milano.

- Maggi, P. N. (1994b): *Il processo edilizio (vol. II) – Metodi e strumenti di ergotecnica edile*, CittàStudi, Milano.

- Maggi P. N., Rejna M. G., Daniotti B., Re Cecconi F., Poli T., Rigamonti B., Jornet A., Teruzzi T. (1999): *Experimental program to evaluate building elements service life: first results on brickwork*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Maggi, P. N. (2002): *Building components' durability, maintenance planning and sustainability*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Manfron, V. (1995): *Qualità ed affidabilità in edilizia*, Angeli, Milano.

- Manfron, V. and Siviero, E. (1998): *Manutenzione delle costruzioni. Progetto e gestione*, UTET, Torino.
- Maranzana, C. (2005): *Galoppano ancora*, Costruire n° 260, gennaio 2005.

- Martin, J. W. et al. (1994): *Methodologies for predicting the service lives of coating systems*, NIST Building Science Series 172, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.

- Masters, L. W. (1987): *Service life prediction – A state of the art*, 4th DBMC, Singapore.

- Molinari, C. (2002): *Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia*, Ed. Sistemi Editoriali, Napoli.

- Molteni, L. (1998): *Elementi di statistica descrittiva per l'analisi dei dati aziendali*, Ed. Guerini, Milano.

- Moser, K. (1999): *Towards the practical evaluation of service life – Illustrative application of the probabilistic approach*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Moser, K. and Edvardsen, C. (2002): *Engineering design methods for service life prediction*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Moss, G. W. (1999): *Service life performance audit: meeting client requirements for durable buildings*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Nicolella, M. (2003): *Programmazione degli interventi in edilizia – Guida al libretto di manutenzione del fabbricato*, Ed. UNI, Milano.

- Pizzi, E. (2000): *La facciata: diagnosi del degrado e interventi di ripristino*, Maggioli, Rimini.

- Pollo, R. (1990): *Affidabilità, qualità, manutenzione: concetti, strumenti e modelli per la manutenzione edilizia*, Ed. Libreria Cortina, Torino.

- Re Cecconi, F. (2002): *Performances lead the way to service life prediction*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Re Cecconi, F. and Iacono, P. (2003a): *Performance Limits Method (PLM) – A new way to service life prediction*, International Workshop on "Management of Durability in the Building Process", Milan, Italy.

- Re Cecconi, F. and Iacono, P. (2003b): *Influence of the degradation of building components on thermal comfort*, 7th International Conference Healthy Buildings, Singapore.

- Re Cecconi, F. and Iacono, P. (2005): *Enhancing the factor method – Suggestions to avoid subjectivity*, 10th DBMC, Lyon, France.

- Rejna, M. G. (1995): *Valutazione della qualità tecnologica utile dei prodotti complessi per l'edilizia*, Quaderno n° 4 del DISET. Politecnico di Milano. Ed. Esculapio, Bologna.

- Rejna, M. G. (1999): *Evaluation of functionality of building components applicable to service life design*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Rejna, M. G. (2002a): *Metodologia applicata alla progettazione e alla programmazione della manutenzione in edilizia*, Epitesto, Milano.

- Rejna, M. G. (2002b): *The methodology for the evaluation of building components' durability*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Rigamonti, G. (2002): *The systematic approach of an experimental to support service life prediction: a 4 years experience on external wall building component*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Rudbeck, C. (1999): *Assessing the service life of building envelope constructions*, 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Sarja, A. and Vesikari, E. (1996): *Durability design of concrete structures*, RILEM Report 14, E & FN Spon, London, United Kingdom.

- Sartoretti, P. (1995): *Comportamento termico di edifici residenziali in regime non stazionario*, degree thesis, Polytechnic of Milan, BEST Department.

- Siemes, T. (2002): *Overview of the service life and maintenance problem probabilistic design*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Sjöström, C., Jenberg, P., Caluwaerts, P., Kelly, S., Haagenrud, S. and Chevalier, J. L. (2002): *Implementation of the European Construction Products Directive via the ISO 15686 standards*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Talon, A., Lair, J. and Boissier, D. (2003): *Failure Mode Effect and Criticality Analysis to improve the quality of building products and processes*, International Workshop on "Management of Durability in the Building Process", Milan, Italy.

- Talon, A., Boissier, D., Chevalier J. L. and Lair, J. (2004): *A methodological and graphical decision tool for evaluating building component failure*, CIB World Building Congress, Toronto, Canada.

- Teply, B., Novak, D., Kersner, Z., Lawanwisut, W. (1999): *Deterioration of reinforced concrete: probabilistic and sensitivity analyses*, Acta Polytecnica and 8th DBMC, Vancouver, Canada.

- Teruzzi, T. Jornet, A. (2002): *Artificial weathering of building components: experimental results on external walls*, 9th DBMC, Brisbane, Australia.

- Torricelli, M. C. (1996): *Il manuale delle pareti in elementi forati di laterizio*, Ed. Laterservice.

- Torricelli, M. C. and Mecca, S. (1996): *Qualità e gestione del processo nella costruzione*, Alinea, Firenze.

Riferimenti normativi

- AIJ (1993): *The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings*, Architectural Institute of Japan, Japan.

- BIA (1992): *New Zealand Building Code. Clause B2 Durability.* Building Industry Authority, Wellington, New Zealand.

- BS 7543:1992 *Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components.* British Standards Institution, London, UK.

- CIB (1999): *Agenda 21 for Sustainable Construction* – Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB Report Publication 23, Rotterdam, The Netherlands.

- CIB (2004a): *Performance based methods for service life prediction. State of the art reports, Part A & Part B* – Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB Report Publication 294, Rotterdam, The Netherlands.

- CIB (2004b): *Guide and bibliography to service life and durability research for buildings and components* – Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB Report Publication 295, Rotterdam, The Netherlands.

- CSA S478-1995 *Guideline on durability in buildings*. Canadian Standards Association, Ottawa, Canada.

- DIN 51130 *Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Arbeitsräume und Arbeitsbereiche mit Rutschgefahr, Begehungsverfahren – Schiefe Ebene*.

- D.P.R. 412/93 *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10*.

- D.P.R. 554/99 *Regolamento di Attuazione della Legge Quadro in materia di Lavori Pubblici, L. 109/94 e s.m.i.*

- EC (1999): *Durability and the Construction Products Directive,* Guidance Paper F, European Commission, DG III, Brussels, Belgium.

- EOTA (1999a): *Assumption of working life of constructional products in guidelines for European Technical Approval, European Technical Approvals and harmonized standards*. EOTA Guidance Document 002, European Organization for Technical Approval, Brussels, Belgium, December.

- EOTA (1999b): *Assessment of working life of products. EOTA Guidance Document 003*. European Organization for Technical Approvals (EOTA), Brussels, Belgium, December.

- EU (1988): *Construction Products Directive*, European Community Council 89/106/EWG updated 93/68/EWG.

- EU (1994): *Interpretative Documents of Council Directive 89/106/EEC*. Official Journal of the European Communities, C62. Vol. 37, 28. February 1994.

- ISO 6241:1984 *Performance standards in buildings – Principles for their preparation and factors to be considered*. International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland.

- ISO 13788 *Hygrothermal performance of building components and building elements – Estimation of internal surface temperature to avoid critical surface humidity and calculation of interstitial condensation.*

- ISO 15686-1:2000 *Building and constructed assets Service life planning: General principles*. International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland.

- ISO 15686-2:2001 *Building and constructed assets – Service life planning: Service life prediction procedures*. International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland.

- L. 10/91 *Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*.

- L. 109/94 e s.m.i. *Legge Quadro in materia di Lavori Pubblici*.

- RILEM (1989): *Systematic methodology for service life prediction of building materials and components.* RILEM Recommendation, Materials and Structures, Vol. 22, pp. 385-392.

- UNI 7357:1974 *Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici*.

- UNI 7867/1:1978 *Edilizia. Terminologia per requisiti e prestazioni. Nozioni di requisito e di prestazione*.

- UNI 7867/2:1978 *Edilizia. Terminologia per requisiti e prestazioni. Specificazione di prestazione, qualità ed affidabilità.*

- UNI 7867/4:1978 *Edilizia. Terminologia per requisiti e prestazioni. Qualità ambientale e tecnologica nel processo edilizio.*

- UNI 7959:1988 *Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Analisi dei requisiti.*

- UNI 8289:1981 *Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione*.
- UNI 8290-1:1981 *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia*.
- UNI 8290-2:1983 *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti.*
- UNI 8290-3:1987 *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti.*
- UNI 9910:1991 *Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio*.
- UNI 10147:2003 *Manutenzione – Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni*.
- UNI 10350:1999 *Componenti edilizi e strutture edilizie – Prestazioni igrometriche: stima della temperatura superficiale interna per evitare umidità critica superficiale e valutazione del rischio di condensazione interstiziale*.
- UNI 10723:1998 *Edilizia – Processo edilizio - Classificazione e definizione delle fasi processuali degli interventi edilizi di nuova costruzione.*
- UNI 10756:1998 *Edilizia – Progettazione operativa di cantiere – Definizioni, struttura e contenuti dei piani operativi per interventi di nuova costruzione*.
- UNI 10838 *Edilizia – Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia*.
- UNI EN 101:1992 *Piastrelle di ceramica – Determinazione della durezza della superficie secondo la scala di Mohs*.
- UNI EN 13306:2003 *Manutenzione – Terminologia*.
- UNI EN ISO 7726:2002 *Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche.*
- UNI EN ISO 7730:1997 *Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico*.
- UNI EN ISO 10545 – 5:2000 *Piastrelle di ceramica - Determinazione della resistenza all'urto mediante misurazione del coefficiente di restituzione*.
- UNI EN ISO 10545 – 7:2000 *Piastrelle di ceramica - Determinazione della resistenza all'abrasione superficiale per piastrelle smaltate.*
- UNI EN ISO 10545 – 13:2000 *Piastrelle di ceramica - Determinazione della resistenza chimica*.
- UNI EN ISO 10545 – 14:2000 *Piastrelle di ceramica - Determinazione della resistenza alle macchie*.